

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nelson Miguel Macedo da Silva Pereira

Desenvolvimento de um Sistema de Levitação
Magnética e Controlo, Aplicado a Janelas
Deslizantes

Nelson Miguel Macedo da Silva Pereira
Desenvolvimento de um Sistema de Levitação
Magnética e Controlo, Aplicado a Janelas Deslizantes

UMinho | 2014

novembro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nelson Miguel Macedo da Silva Pereira

Desenvolvimento de um Sistema de Levitação Magnética e Controlo, Aplicado a Janelas Deslizantes

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Gerardo Vieira da Rocha
e coorientação do
Professor Doutor Senentxu Lanceros-Mendez
Doutor Vítor Manuel Gomes Correia

DECLARAÇÃO

Nelson Miguel Macedo da Silva Pereira

Endereço eletrónico: a58761@alunos.uminho.pt Telefone:

Número do Bilhete de Identidade: 13576339

Título da Tese:

**Desenvolvimento de um Sistema de Levitação Magnética e Controlo,
Aplicado a Janelas Deslizantes**

Orientador:

Professor Doutor José Gerardo Vieira da Rocha

Coorientador:

Professor Doutor Senentxu Lanceros-Mendez

Doutor Vítor Manuel Gomes Correia

Ano de conclusão: 2014

Tese submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO
DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

“The value of an idea lies in the using of it.”

Thomas A. Edison.

Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem o apoio e a contribuição de algumas pessoas, às quais transmito os meus mais sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Doutor José Gerardo Vieira da Rocha, pela confiança depositada em mim para desenvolver este trabalho e pela disponibilidade demonstrada na orientação e na partilha de conhecimentos e ideias.

Aos meus coorientadores Doutor Senentxu Lanceros-Mendez e Doutor Vítor Manuel Gomes Correia por todo o apoio e orientação prestada, mostrando-se sempre disponíveis para a partilha de opiniões nunca colocando em causa as minhas capacidades.

Aos meus colegas e amigos, em especial Jorge Manuel da Silva Fernandes pelas ajudas, apoio prestado e companheirismo em todos os momentos. Aos membros do grupo *Electroactive Smart Materials* (ESM), ao qual está inserido este projeto, um obrigado pelo apoio prestado.

Aos técnicos das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial, Carlos Torres, Joel Almeida e Ângela Macedo, por todo o auxílio e disponibilidade prestado no desenvolvimento deste projeto.

Aos meus familiares, uma palavra de apreço reforçada, pela compreensão e motivação constantes, tanto nos bons e como nos maus momentos, ao longo de todo o período da minha formação.

Resumo

No âmbito deste trabalho foi desenvolvida uma solução inovadora e viável recorrendo a eletroímãs e ímãs permanentes para aplicações que utilizem sistemas de deslizamento, de forma a controlar a altura de levitação em função da carga.

Tendo em conta o caráter contínuo e permanente dos campos magnéticos gerados pelos ímãs permanentes, que não permitem controlo de acordo com a massa do corpo, foi necessária a implementação de um sistema híbrido baseado na utilização conjunta de eletroímãs.

De forma a tornar o sistema adaptativo a diferentes aplicações surgiu a necessidade de o tornar modular, cada módulo sendo ativado em caso de necessidade, reduzindo também os custos energéticos do sistema. Cada módulo contém um conjunto de ímãs permanentes e eletroímãs, tornando os módulos independentes fáceis de manusear e de rápida substituição em caso de avaria sem a necessidade de efetuar alterações a nível de *software*.

O dimensionamento dos eletroímãs foi realizado com recurso a *software* de análise de elementos finitos Ansoft Maxwell, calculando as distâncias e forças entre a pista e o veículo, quantidade de elementos magnéticos passivos e ativos necessários, assim como o *gap* entre ímãs.

Para o controlo da altura e monitorização da levitação foi desenvolvido um sistema eletrónico de controlo modular, onde cada módulo efetua a comunicação com um controlador principal através do protocolo de comunicação MODBUS.

Como resultado final foi desenvolvido um sistema de deslizamento por levitação magnética, a ser instalado em sistemas de janelas deslizantes, fiável e que desempenha todas as suas funções com máxima performance e segurança, de forma a reduzir os custos de manutenção na substituição de componentes que sofrem fricção, tais como os rolamentos.

Palavras-chave: Levitação magnética, Magnetismo, Ímãs Permanentes Eletroímãs, Maglev, MODBUS.

Abstract

Within the scope of this work it was developed an innovative and feasible solution for applications using sliding systems enabling control of the levitation height depending on the load. The solution was based on the use of electromagnets and permanent magnets.

The hybrid system has to be implemented as the permanent magnetic fields generated by the permanent magnets do not enable control of the levitation height depending on the mass body.

In order to develop a system able to be adapted to different applications, it became necessary to be modular. Each module operates only when needed, reducing also energy costs of the system. Each module contains a set of permanent magnets and electromagnets, making them easy to handle and independent for easy replacement in case of failure, without the need to perform changes at the software level.

The design of the electromagnets was conducted using the finite element analysis software Ansoft Maxwell, calculating the distances and forces between the track and the vehicle, number of active and passive magnetic elements needed, as well as the gap between the magnets.

For controlling and monitoring the levitation height, a modular electronic control system was developed, where each module performs communication with a host controller via the MODBUS communication protocol.

As a final result a sliding magnetic levitation system was developed, to be installed on sliding windows systems. The system is reliable and performs all this functions with maximum performance and safety, to reduce maintenance costs in the replacement of components suffering friction.

Keywords: Magnetic Levitation, Magnetism, Permanent Magnets Electromagnets, Maglev, MODBUS.

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIX
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 ESTADO DE ARTE.....	5
2.1. SISTEMAS DE TRANSPORTE TERRESTRES.....	5
2.1.1. <i>Transrapid</i>	9
2.1.2. <i>JR MAGLEV MLX01</i>	11
2.1.3. <i>INDUCTRAK</i>	14
2.2. SISTEMAS DE TRANSPORTE INDUSTRIAIS.....	16
2.2.1. <i>MagneMover Lite</i>	16
2.2.2. <i>QuickStick</i>	17
2.3. OUTRAS APLICAÇÕES.....	19
2.3.1. <i>Levitação de uma esfera de aço</i>	19
2.3.2. <i>Rolamentos magnéticos</i>	22
CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
3.1. ELETROMAGNETISMO	25
3.1.1. <i>Lei de Gauss</i>	25
3.1.2. <i>Lei da Força de Lorentz</i>	26
3.1.3. <i>Lei de Biot-Savart</i>	26
3.1.4. <i>Lei de Ampere</i>	27
3.1.5. <i>Lei de Faraday</i>	27
3.1.6. <i>Equações de Maxwell</i>	28
3.1.7. <i>Campo magnético em Bobinas</i>	29
3.1.8. <i>Materiais ferromagnéticos</i>	30
3.1.9. <i>Efeito de Hall</i>	34
3.2. COMUNICAÇÃO.....	36
3.2.1. <i>RS-485</i>	36
3.2.2. <i>MODBUS</i>	38
CAPÍTULO 4 ESTRUTURA MODULAR	43
4.1. ANÁLISE	43
4.2. SIMULAÇÕES DAS TOPOLOGIAS ELETROMAGNÉTICAS	45
4.2.1. <i>Topologia I</i>	46
4.2.2. <i>Topologia E</i>	49
4.2.3. <i>Simulações protótipo final</i>	54
4.3. METODOLOGIA	56
4.3.1. <i>Topologia I</i>	56
4.3.2. <i>Protótipo inicial</i>	57
4.3.3. <i>Protótipo final</i>	59
CAPÍTULO 5 ELETRÓNICA DE CONTROLO	63
5.1. ANÁLISE	63

5.1.1.	<i>Controladores</i>	64
5.1.2.	<i>Sensor de leitura para o gap</i>	68
5.1.3.	<i>Dispositivo Atuador</i>	69
5.1.4.	<i>Fonte de alimentação</i>	71
5.2.	METODOLOGIA	72
5.2.1.	<i>Protocolo de Comunicação</i>	73
5.2.2.	<i>Dicionário de dados</i>	76
5.2.3.	<i>Controlo de levitação</i>	79
5.2.4.	<i>Controlo de posição</i>	82
5.2.5.	<i>Endereçamento</i>	84
5.2.6.	<i>Interface</i>	87
CAPÍTULO 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO		91
6.1.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	91
6.1.1.	<i>Topologia I</i>	91
6.1.2.	<i>Topologia E57</i>	93
6.1.3.	<i>Topologia E60</i>	94
6.1.4.	<i>Protótipo inicial</i>	95
6.1.5.	<i>Sensor de posição</i>	97
6.2.	PROTÓTIPO FINAL	98
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO		101
7.1.	CONCLUSÃO.....	101
7.2.	TRABALHO FUTURO	101
REFERÊNCIAS		105
ANEXOS		107
ANEXO 1 - ESQUEMÁTICO E PCB DA PLACA <i>DRIVE</i>		107

Índice de Figuras

Figura 2.1 Técnicas de levitação [6]	7
Figura 2.2 Transrapid Alemão[7]	7
Figura 2.3 Linimo Urbano (HSST japonês) [7]	8
Figura 2.4 Rotem Urbano (UTM Sul coreano)[7]	8
Figura 2.5 JR Maglev MLX01 [7]	8
Figura 2.6 Transrapid [8]	9
Figura 2.7 Sistema de propulsão [8]	10
Figura 2.8 Sistema de orientação e suspensão [8].....	11
Figura 2.9 Exemplo de um supercondutor [1].	12
Figura 2.10 Efeito de <i>Meissner</i> [1]	12
Figura 2.11 Esquema estrutural do MLX01[9]	13
Figura 2.12 Sistema Inductrack com <i>Halbach array</i> [11][10].....	14
Figura 2.13 Protótipo para a NASA[13]	16
Figura 2.14 MagneMover Lite [14]	17
Figura 2.15 Layout QuickSitck [14].	18
Figura 2.16 Bancada de teste do sistema de levitação.[15].....	19
Figura 2.17 Posicionamento do sensor ótico [15].	20
Figura 2.18 Levitação estável da esfera [15].	21
Figura 2.19: Rolamento Magnético - <i>SRG Bearing</i> [17].	22
Figura 2.20 Turbina eólica Maglev [1]	23
Figura 3.1 Circulação do campo magnético ao longo de uma corrente [20].....	26
Figura 3.2 Experiências executadas por Michael Faraday.[21].....	28
Figura 3.3 Esquema das linhas de campo numa bobine [23]	30
Figura 3.4 Campo magnético de uma bobina com núcleo de ar (a), bobina com núcleo de ferro. [22].....	31
Figura 3.5 Polaridade do ferro.	31
Figura 3.6 Circuito magnético com núcleo de ferro. [22].....	32
Figura 3.7 Curva da histerese magnético.[20]	32
Figura 3.8 Ciclos de histerese para materiais duros e macios. [20]	33
Figura 3.9 Geometria para calcular a tensão de Hall.[18].....	34
Figura 3.10 Estruturas de comunicação RS-485 [26].	37
Figura 3.11 Sinais mínimos no barramento. [26].....	37
Figura 3.12 Transmissão entre dispositivos <i>master</i> e <i>slave</i>	38
Figura 3.13 Esquema de comunicação do modo RTU.....	39
Figura 3.14 Quadro de dados para exceções.....	40
Figura 3.15 Descrição do processo de transmissão de uma mensagem	41
Figura 4.1 Dimensões da janela para protótipo final	43
Figura 4.2 Formatos das geometrias do sistema de levitação	45
Figura 4.3 a) Eletroímã topologia, b) Eletroímã topologia E	46
Figura 4.4 Configuração para topologia I	46
Figura 4.5 Simulação do campo magnético em Ansoft Maxwell.	47

Figura 4.6 Simulação do campo magnético em função da corrente com núcleo.	47
Figura 4.7 Simulação do campo magnético em função da corrente sem núcleo	48
Figura 4.8 Simulação do eletroímã em topologia I com ímã permanente 20x10x5	48
Figura 4.9 Variação da força no eletroímã de topologia I.....	49
Figura 4.10 Simulação do campo magnético da topologia E com 1 A	50
Figura 4.11 Gráfico do campo magnético em função da superfície do eletroímã.	50
Figura 4.12 Diagrama de leitura.....	51
Figura 4.13 Comparação entre diferentes dimensões de laminações do tipo E.....	51
Figura 4.14 Campos Magnéticos do eletroímã de topologia E com ímãs permanentes.	52
Figura 4.15 Força produzida pelo eletroímã de topologia E com os ímãs permanentes.	53
Figura 4.16 Simulação com ímãs permanentes totais.....	54
Figura 4.17 Força produzida pelo eletroímã e ímãs permanentes total.	54
Figura 4.18 Vista de frente da simulação do módulo de levitação.....	55
Figura 4.19 Vista de cima da simulação do módulo de levitação	55
Figura 4.20 Gráfico da força de repulsão em função do gap entre o veículo e a estrutura fixa para diferentes níveis de corrente.	56
Figura 4.21 Eletroímã em topologia I	57
Figura 4.22 Protótipo em topologia vertical.....	57
Figura 4.23 Bobinagem para o eletroímã de topologia E	58
Figura 4.24 Estrutura de testes do sistema de levitação.	58
Figura 4.25 Estrutura do protótipo final.....	60
Figura 4.26 Sistema de ajuste.....	60
Figura 4.27 Estrutura de protótipo final da janela.....	61
Figura 4.28 Janela, calha para ímãs.	61
Figura 5.1 Diagrama de blocos do sistema de controlo.....	63
Figura 5.2 <i>LAUNCHPAD MSP-EXP430G2</i>	65
Figura 5.3 Módulo LCD SSD1963	66
Figura 5.4 <i>Shield</i> para Arduino Due.....	67
Figura 5.5 Placa de desenvolvimento Arduino Due	68
Figura 5.6 Sensor de efeito Hall A1302.....	69
Figura 5.7 <i>Mosfet</i> STP16NF06 e Kit de isolamento	71
Figura 5.8 Fonte de alimentação AD2415	72
Figura 5.9 Visão geral do sistema	72
Figura 5.10 Esquema Logico do <i>transceiver</i> SN65176B [38].	73
Figura 5.11 Algoritmo de receção da comunicação MODBUS	75
Figura 5.12 Rotina de envio da comunicação MODBUS	76
Figura 5.13 Configuração do posicionamento do sensor Hall	80
Figura 5.14 Campo Magnético entre dois ímãs iguais	80
Figura 5.15 Placa <i>drive</i>	81
Figura 5.16 Fluxograma do controlo do eletroímã.....	82
Figura 5.17 Representação do sistema de posicionamento	82
Figura 5.18 Controlo de posição do sistema de controlo	84

Figura 5.19 Esquema do sistema de endereçamento.....	85
Figura 5.20 Endereçamento de módulos.....	86
Figura 5.21 Menu principal	87
Figura 5.22 Menu de opções.....	87
Figura 5.23 Menu de escolha da janela.....	88
Figura 5.24 Interface de endereçamento	88
Figura 5.25 Configuração dos parâmetros do controlador PID.....	89
Figura 5.26 Calibração do sensor de efeito de Hall.	89
Figura 5.27 Interface teclado	89
Figura 6.1 GM08 da HIRST Magnetic Instruments.....	91
Figura 6.2 Resultado com núcleo ferromagnético	92
Figura 6.3 Resultado sem núcleo ferromagnético.....	92
Figura 6.4 Leitura do campo magnético do eletroíman em topologia E.	93
Figura 6.5 Valores práticos do eletroíman 57	94
Figura 6.6 Eletroíman E60.....	94
Figura 6.7 Leitura do campo magnético do eletroíman E60	95
Figura 6.8 Teste de força no equipamento Shimadzu Autograph	96
Figura 6.9 Teste da força produzida pelo protótipo.	97
Figura 6.10 Variação da distância em função da tensão no sensor de efeito de Hall.	98
Figura 6.11 Estrutura fixa da janela deslizante	98
Figura 6.12 Estrutura fixa, vista traseira.	99
Figura 6.13 Estrutura Fixa, vista de cima	99
Figura 6.14 Controlador.....	99
Figura 6.15 Protótipo final.....	100
Figura 7.1 Esquema da colocação dos sensores de posicionamento.	102

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 Características dos ímanes permanentes	44
Tabela 4.2 Parâmetros do fio para a indutância da topologia I	47
Tabela 4.3 Parâmetros elétricos do eletroímã	49
Tabela 4.4 Parâmetros do eletroímã E60	59
Tabela 5.1 Comparação de microcontroladores para os módulos	64
Tabela 5.2 Comparação de microcontroladores para controlador.....	67
Tabela 5.3 Parâmetros de funcionamento do sensor de efeito Hall A1302.....	69
Tabela 5.4 Parâmetros do <i>mosfet</i> STP16NF06	70
Tabela 5.5 Características da fonte de alimentação	71
Tabela 5.6 Ler Registos	77
Tabela 5.7 Escrever registo único	78
Tabela 5.8 Escrever registos múltiplos	78

Lista de Abreviaturas

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DIP	<i>Dual In-Line Package</i>
EDS	<i>Electrodynamic Suspension</i>
EIA	<i>Eletronics Industries Association</i>
EMS	<i>Electromagnetic Suspension</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
HSST	<i>High Speed Transit System</i>
IC	<i>Integrated circuit</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LSM	<i>Linear Synchronous Motor</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation,</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SMD	<i>Semi Metallic Disc</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/ Transmitter</i>
UTM	<i>Urban Transport Maglev</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será introduzido o tema da dissertação, apresentada a motivação para o desenvolvimento deste projeto, os objetivos a atingir e, por forma a permitir uma maior compreensão do documento, será explicada a organização deste.

1.1. Identificação do Problema

Com o intuito de reduzir os desgastes mecânicos produzidos pelo atrito dos componentes mecânicos em janelas deslizantes, foi proposto o trabalho de dissertação, conducente a redução deste desgaste.

Avaliando as soluções existentes no mercado a escolha baseada na tecnologia de levitação magnética surgiu como a mais apropriada. Um sistema de levitação magnético aplicado a sistemas de deslizamento proporciona um sistema sem desgaste dos componentes mecânicos, um sistema com custos de manutenção reduzidos, e com baixos consumos energéticos. Estes fatores são preponderantes para o desenvolvimento do sistema.

Para aumentar a sustentabilidade do sistema surgiu a necessidade de o tornar flexível em termos de versatilidade na sua implementação. Assim será desenvolvida uma solução modular para que seja possível adaptar a diferentes locais e diferentes configurações de janelas.

1.2. Motivação

Esta Dissertação de Mestrado pretende dar continuidade ao desenvolvimento de sistemas de levitação magnética em sistemas de deslizamento, com o intuito de reduzir os problemas relacionados com o desgaste mecânico de sistemas de deslizamento em janelas, e consequentemente aumentar a fiabilidade dos sistemas.

A multidisciplinaridade do trabalho engloba praticamente todas as áreas de conhecimento envolvidas ao longo da formação académica, tornando o trabalho desenvolvido uma experiência de aprendizagem proveitosa. Grande parte das principais áreas de estudo académica foram incorporadas neste trabalho, já que, é necessário adquirir conhecimentos na área de instrumentação e sensores de forma a ler os sinais analógicos e realizar o acondicionamento dos valores obtidos pelos sensores, conhecimentos em teoria de controlo de forma a desenvolver e adaptar estratégias de controlo, e também a experiência na programação de microcontroladores de forma a controlar todo o sistema.

Com o desenvolvimento deste trabalho espero evidenciar as potencialidades deste sistema comparativamente às soluções tradicionais para que, em situações futuras venha a ser implementado.

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de levitação magnética para janelas deslizantes.

Para atingir estes objetivos são necessárias as seguintes tarefas (objetivos parciais):

Em primeiro lugar, estudadas as técnicas de levitação magnética usando ímanes permanentes e eletroímãs, dando principal foco ao desenvolvimento do sistema eletrónico de acionamento dos eletroímãs e respetivo controlo, *software* de gestão de módulos, eletrónica de potência, bem como a implementação e testes do sistema.

Avaliação das técnicas de levitação magnética com recurso a *software* de análise de elementos finitos FEMM, calculando as distâncias e forças entre a pista e o veículo, quantidade de elementos magnéticos passivos e ativos necessários, assim como o gap entre ímanes.

Desenvolvimento de um interface de gestão de módulos desenvolvido de modo a que os módulos sejam adaptativos à aplicação onde estão inseridos, permitindo uma rápida configuração dos parâmetros de controlo na introdução ou remoção de módulos.

Estudo e implementação de um protocolo de comunicação, devido à necessidade de comunicar entre módulos reduzindo a complexidade na manutenção e instalação do sistema.

Estudo relativo à escolha da eletrónica de controlo e potência de forma a decidir de entre as soluções existentes, a melhor a ser implementada tendo em conta os custos e desempenho do sistema.

1.4. Organização e Estrutura da Dissertação

Nesta secção vai ser descrita a organização deste documento, explicando sucintamente os temas abordados e desenvolvidos em cada capítulo.

No Capítulo 2 será abordado o estado de arte, apresentando algumas soluções existentes relacionadas com o tema em estudo. Assim serão apresentadas as soluções com tecnologia Maglev, sistemas de transporte industriais e, ainda soluções que utilizam a tecnologia Maglev fora do contexto dos transportes terrestres.

No Capítulo 3 apresentar-se-ão os conceitos teóricos necessários para a compreensão do tema em estudo.

No Capítulo 4, serão abordadas as especificações do sistema, metodologias adotadas, modo de funcionamento dos componentes utilizados assim como todos os testes efetuados em ambiente de simulação dos circuitos magnéticos.

De seguida no Capítulo 5, descreve-se o sistema de controlo, composto por vários elementos, desde o *hardware* ao *software* que em conjunto garantem o controlo sobre o protótipo desenvolvido.

Segue-se o Capítulo 6 onde serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em relação ao protótipo desenvolvido.

Por fim, no Capítulo 7 serão apresentadas as conclusões retiradas com o desenvolvimento deste projeto de dissertação assim como a realização de possíveis trabalhos a realizar no futuro

Capítulo 2

Estado de Arte

Este capítulo tem como principal objetivo reunir e analisar o estado da tecnologia e as soluções existentes, bem como fundamentar teoricamente o trabalho realizado.

Neste capítulo serão apresentadas as diferentes tecnologias de sistemas de levitação magnética atualmente existentes nos sistemas de transporte e sistemas industriais.

Embora a aplicação da tecnologia em sistemas de transporte tenha sido o principal foco, esta tecnologia não está limitada aos transportes, podendo ser aplicada a diversos sistemas, tais como sistemas de transporte aeroespacial, sistemas biomédicos e químicos, sistemas de energia, aplicações domésticas entre outros.

2.1. Sistemas de Transporte Terrestres

O conceito de comboios levitados magneticamente foi primeiro introduzido há mais de 100 anos, por dois americanos, Robert Goddard e Emile Bachelet [1]. Em 1904 o cientista Robert Goddard propôs uma forma de viajar sem atrito elevando o comboio acima da pista por repulsão eletromagnética, assim o comboio iria viajar a velocidades superiores dentro de um tubo de vácuo[2]. Em 1910 o engenheiro Emile Bachelet patenteou um carro ferroviário que para o propósito de levitação utilizava eletroímãs com corrente alternada, e para propulsão eletroímãs em intervalos ao longo da pista ferroviária[2]. Em 1934 o engenheiro Herman Kemper patenteou um veículo flutuante baseado em levitação usando eletroímãs na pista [3]. A sua invenção levou a uma extensiva pesquisa sobre a tecnologia de levitação magnética [4], finalmente realizou a demonstração de transporte público em 2003 em Shanghai.

O sistema de levitação magnética (*maglev*) é um dos melhores candidatos para satisfazer os requerimentos de velocidade, meio ambiente e segurança.

O comboio *maglev* oferece inúmeras vantagens em comparação com o sistema convencional de roda e carril, tais como[5]:

- Eliminação da roda e desgaste do carril, consequentemente reduzindo os custos de manutenção;
- Redução dos custos de construção do carril, devido ao peso das cargas distribuído;
- Devido ao sistema de carril o comboio *maglev* nunca poderá ser descarrilado;
- A ausência de rodas remove vibrações e ruído;
- O sistema sem contacto previne o escorregamento ou deslizamento;
- Alcança velocidades superiores e curva em menor raio;
- Realiza acelerações e desacelerações rapidamente;
- Faz com que seja possível eliminar engrenagens, rolamentos, eixos, etc.;
- É menos suscetível a condições meteorológicas.

No entanto, devido a não existir contacto entre as rodas e o carril no comboio *maglev* os motores de tração tem de proporcionar propulsão e travagem com direta interação eletromagnética com o carril. Quanto maior for o peso, mais energia é necessária para suportar as forças de levitação. Devido à estrutura das guias a comutação e ramificação é difícil, o campo magnético gerado pelos eletroímãs para propulsão e levitação afeta o compartimento dos passageiros, que tem de ser devidamente isolado[5].

Enquanto um comboio tradicional usa motores rotativos para propulsão e depende do sistema de carris para orientação. O comboio *maglev* usa um motor linear para propulsão e eletroímãs para suporte e orientação.

Tipicamente existem dois tipos de abordagens à levitação magnética, através de suspensão eletromagnética (EMS) ou suspensão eletrodinâmica (EDS) [5]. Uma outra abordagem a sistemas de levitação é o caso do *Indutrack* Americano, com a utilização de ímãs permanentes. Uma observação geral dos sistemas pode ser observada na Figura 2.1.

Levitation Techniques

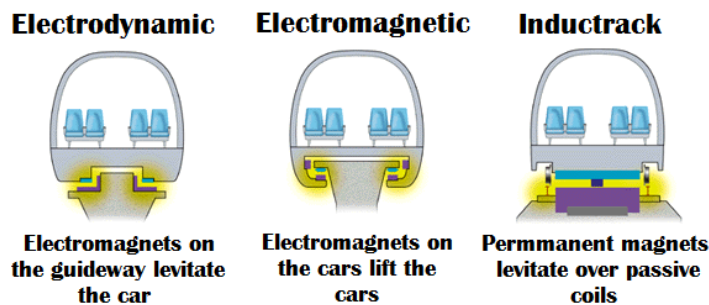


Figura 2.1 Técnicas de levitação [6]

Nos sistemas de EMS existem duas tecnologias, levitação e orientação integrada e levitação e orientação separada.[5]

Os sistemas de levitação e orientação separada, como o caso do *Transrapid* Alemão (Figura 2.2), é favorável para operações de elevada velocidade, devido ao sistema de levitação e de orientação não interferem um com o outro. Tendo como desvantagem o aumento de número de controladores[5].



Figura 2.2 Transrapid Alemão[7]

Os sistemas de levitação e orientação integrada podem ser encontrados no HSST Japonês, da Figura 2.3, e no UTM Coreano, da Figura 2.4. O consumo elétrico neste tipo de sistema é menor, mas devido à integração dos dois sistemas com o aumento da velocidade existe interferência entre eles, o que torna-o difícil de controlar. Este sistema é utilizado para operações de baixo custo e baixas velocidades [5].



Figura 2.3 Linimo Urbano (HSST japonês) [7]



Figura 2.4 Rotem Urbano (UTM Sul coreano)[7]

Os sistemas EDS podem ser divididos em dois tipos, sistemas com o uso de ímanes permanentes e com supercondutores. Os sistemas com o uso de ímanes permanentes são utilizados em transportes de pequenas dimensões, devido à ausência de ímanes permanentes com forças elevadas [5]. O sistema com supercondutores necessita de recursos estruturais mais complexos, devido ao sistema de arrefecimento, que pode causar problemas durante a operação [5]. Estes dois sistemas podem ser encontrados no MLX01 japonês da Figura 2.5



Figura 2.5 JR Maglev MLX01 [7]

Devido ao sistema Maglev alemão Transrapid e o sistema Maglev MLX serem os sistemas de levitação magnética mais utilizados no transporte terrestres de alta velocidade, serão apresentadas na próxima secção as respectivas tecnologias.

2.1.1. Transrapid

O sistema alemão, *Transrapid*, usa o princípio das forças de atração (suspensão eletromagnética EMS), como se pode observar pela Figura 2.6. O sistema de levitação é conseguida com base na força de atração magnética entre a guia, composta por estatores e os eletroímãs presentes no comboio.

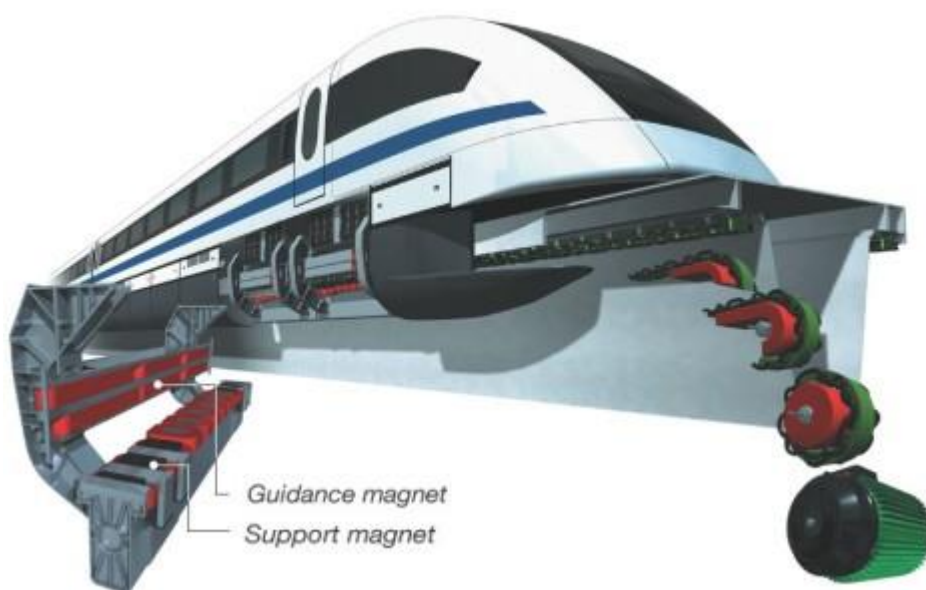


Figura 2.6 Transrapid [8]

Este sistema é extremamente instável devido às características do circuito magnético, isto é com uma pequena alteração na distância entre a guia e o comboio, as forças de atração variam drasticamente. De forma a conseguir manter o *air-gap* uniforme sem divergir da posição ótima de funcionamento é necessário um sistema de controlo preciso. Este controlo torna-se difícil com o aumento da velocidade, devido ao uso de um *air-gap* constante de aproximadamente 10 mm, contudo torna possível a levitação com velocidades nulas ou muito baixas[5] [1].

Para exercer a levitação do comboio, o *Transrapid* contém eletroímãs de suporte eletronicamente controlados localizados no comboio, que o puxam para o estator ferromagnético por baixo da guia. Com este fim o *Transrapid* consome uma potência inferior à do ar condicionado instalado. O sistema de levitação é alimentado por baterias localizadas a bordo, tornando o sistema de levitação independente do

sistema de propulsão, com uma autonomia de uma hora sem uma fonte de energia externa em caso de falha do sistema de alimentação [8]. Estas baterias são carregadas no por geradores lineares integrados na guia [5][8].

O sistema de propulsão utiliza um motor linear síncrono (LSM), também utilizado na travagem. O motor linear tem o estator ferromagnético localizado por baixo da guia e os eletroímãs de suporte são utilizados como rotor. A corrente a passar nas bobinas do estator esta constantemente a mudar a sua polaridade. Esta mudança na sua polaridade permite que os campos magnéticos criados puxem e empurrem o comboio na direção pretendida, como mostra a Figura 2.7.

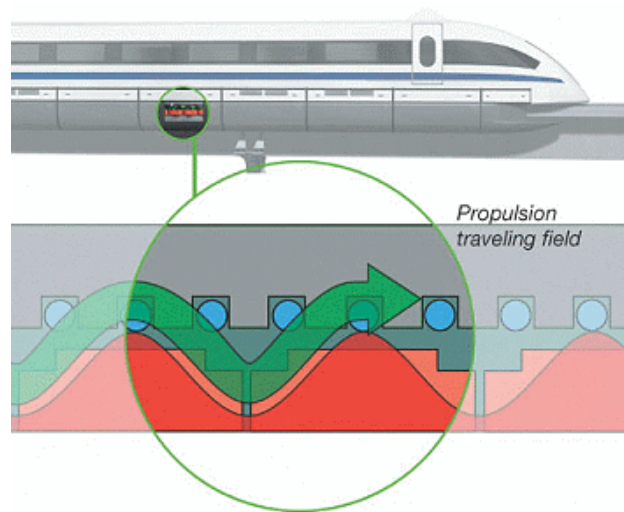


Figura 2.7 Sistema de propulsão [8]

O *Transrapid* pode regular a sua velocidade variando a frequência da corrente aplicada. Para a travagem o sistema de controlo inverte a direção do campo magnético, o que torna o motor linear síncrono em um gerador, assim trava o veículo sem a existência de contacto mecânico devolvendo a energia da travagem ao sistema elétrico [8].

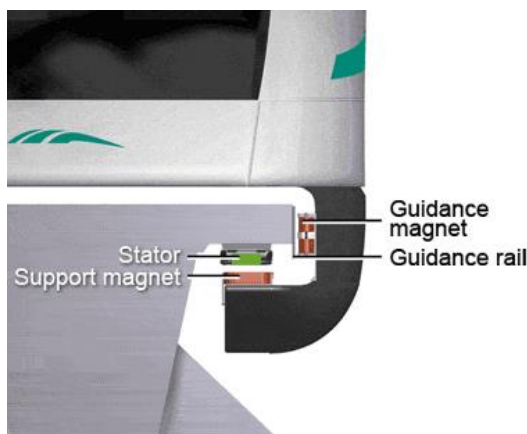


Figura 2.8 Sistema de orientação e suspensão [8]

O sistema de orientação é composto por eletroímãs de orientação colocados ao longo do veículo em ambos os lados, de forma a manter o veículo lateralmente na pista [8], como é possível observar na Figura 2.8. De forma a manter uma folga constante entre a guia e o comboio são utilizados sistemas eletrónicos de controlo.

O sistema *Transrapid* tem uma pista de testes na Alemanha, Emsland e opera comercialmente em Xangai, China desde 2004.

2.1.2. JR MAGLEV MLX01

O sistema japonês utiliza suspensão eletrodinâmica (EDS), que usa forças de repulsão para levitação. Quando as bobinas supercondutoras fixas a bordo se movem sobre as bobinas de indução localizados na pista, a corrente induzida passa pelas bobinas e gera um campo magnético. A força de repulsão entre o campo magnético e as bobinas supercondutoras a bordo levitam o veículo.

No sistema EDS os supercondutores produzem uma supercorrente que cria um espelho perfeito de polos magnéticos constantes. Este espelho fornece ao íman uma estável repulsão que causa os ímanes a levitar, o chamado efeito de *Meissner*. O supercondutor deve ser arrefecido com nitrogénio líquido. Nestas condições o íman é capaz de rodar, oscilar ou saltar sem que ele seja projetado para fora do campo magnético[1]. Na Figura 2.9 está apresentado um exemplo de um supercondutor.



Figura 2.9 Exemplo de um supercondutor [1].

Quando campo magnético é aplicado a um supercondutor a temperaturas perto da temperatura crítica de transição, as linhas de campo penetram diretamente no material. Mas quando o material é arrefecido à temperatura crítica e entra no estado de supercondutor, as linhas do campo magnético são afastadas do material supercondutor.[1]

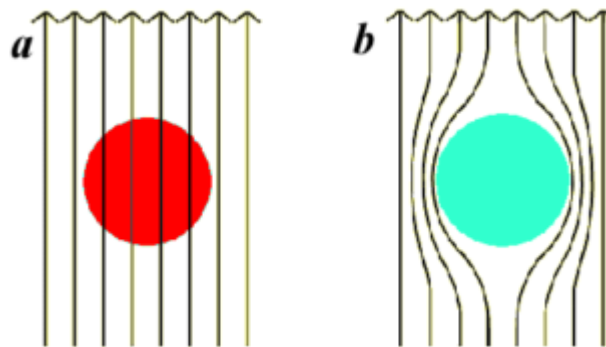


Figura 2.10 Efeito de Meissner [1]

Na Figura 2.10 a) estão apresentadas as linhas de campo a penetrar por um supercondutor a temperaturas acima da sua temperatura crítica de transição para supercondutor. Na Figura 2.10 b) quando o supercondutor é arrefecido abaixo da temperatura de transição, as linhas são afastadas do interior do supercondutor.

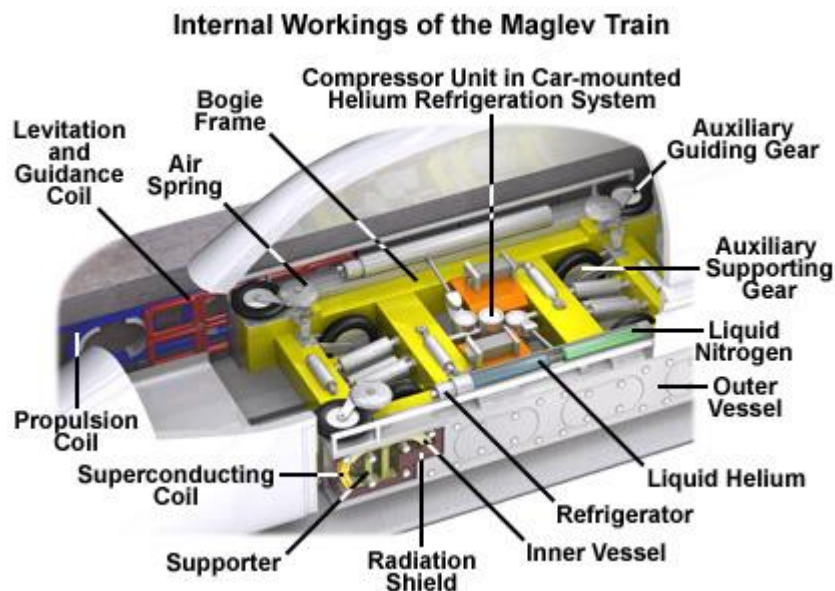


Figura 2.11 Esquema estrutural do MLX01[9]

Contrariamente ao sistema alemão (EMS) este é extremamente estável magneticamente, sendo desnecessário efetuar controlo do *air-gap*. O sistema japonês tem um *air-gap* de cerca de 100 mm auto estável, sendo assim muito fiável para variações de carga. Este sistema é adequado para transportes de grande velocidade e transporte de cargas. Contudo este sistema precisa de uma velocidade elevada para produzir as correntes de indução para provocar a levitação, assim necessita de se suportar em rodas até obter uma velocidade de cerca de 100km/h [5] [7].

O MLX01 utiliza um motor linear síncrono para a propulsão, como o *Transrapid* alemão, a principal diferença está no uso de supercondutores com núcleo de ar ao contrário de eletroímãs com núcleo de ferro do *Transrapid*.

Em 2 de dezembro de 2003 o MLX01 com três carros atingiu uma velocidade máxima de 581 km/h, que conseguiu o record mundial [5] [7]. Tecnicamente o comboio japonês é capaz de atingir velocidades superiores [7].

O sistema de orientação é conseguido a partir da conexão das bobinas de levitação correspondentes a ambas paredes da pista. Quando o veículo se desloca lateralmente, são geradas forças de estabilização e orientação [5].

2.1.3. INDUTRACK

O sistema INDUTRACK foi desenvolvido e testado em modelos de pequena escala. O sistema emprega conjuntos especiais de ímanes permanentes denominados de *Halbach array* no veículo.

O *Halbach array* apresenta um uso eficiente dos ímanes permanentes para criar um campo magnético periódico perto da superfície inferior do conjunto. Isto é conseguido cancelando o campo acima do conjunto, enquanto produzindo a campo magnético quase puramente sinusoidal por baixo do conjunto [10]. Na Figura 2.12 está representado o conceito Inductrack, é possível observar o *Halbach array* a movimentar-se acima dos condutores do circuito de levitação e o circuito equivalente do sistema.

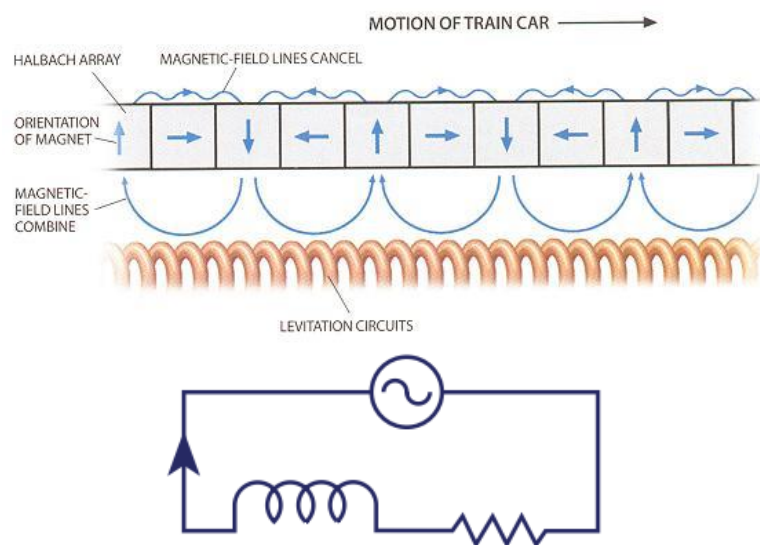


Figura 2.12 Sistema Inductrack com *Halbach array* [11][10]

O sistema de controlo pode ser implementado por uma grande variedade de mecanismos. O mais simples, implementado em um modelo em construção para a NASA, baseado na colocação de bobinas de *drive* especiais intercaladas com as bobinas do circuito de levitação e depois enviar um pulso sincronizado com a posição da componente vertical dos campos de *Halbach*. Outro sistema pode ser através do uso do sistema de controlo utilizado em motores lineares de indução, como os outros comboios Maglev. Uma terceira solução seria o uso de turbinas na traseira do carro para executar a propulsão do comboio Inductrack em aéreas abertas, enquanto sistemas de controlo elétricos embebidos na pista eram utilizados em áreas citadinas removendo a necessidade das turbinas, reduzindo o ruído. [10]

A elevada eficiência magnética do *Halbach array*, mais o uso de circuitos embutidos na pista, resulta em forças de levitação de cerca de 40 toneladas por metro quadrado (usando conjuntos de ímanes permanentes de NdFeB, em que o seu peso é tipicamente uma baixa percentagem do peso de levitação). O sistema do circuito magnético é estável, devido ao uso de forças de repulsão associadas as correntes induzidas previnem a instabilidade associada com o teorema de Earnshaw, mas necessita de movimento para levitação. Em caso de falha do sistema de controlo resulta em que o comboio reduza a velocidade e ative em rodas auxiliares a baixa velocidade [10].

Levitação magnética em comboios de alta velocidade está em desenvolvimento á várias décadas. Como anteriormente explicada existem sistemas *maglev*. A principal razão que os sistemas *maglev* tem uma concretização lenta pode ser o custo e complexidade. O conceito Inductrack aponta para uma abordagem mais simples e com um custo mais reduzido que o *maglev* [10].

No passado, o uso de ímanes permanentes em sistemas *maglev* foi rejeitada por várias razões, tendo como razão principal a não produção das forças de levitação necessárias comparando com o peso dos próprios ímanes.

O sistema Inductrack ainda não se encontra implementado comercialmente. Existem dois projetos Inductrack em desenvolvimento, o Indutrack I para altas velocidades e o Inductrack 2 para baixas velocidades [12].

A NASA particionou na construção de um novo modelo para altas velocidades. A motivação da NASA é investigar a viabilidade para o lançamento de grandes foguetões através da aceleração destes numa pista Maglev até atingir velocidades mach 0.8 (980 km/h) antes de os lançar. Com isto pretendem poupar cerca de 40 por cento do combustível, abrindo a possibilidade para missões em baixa orbita com custos reduzidos. O protótipo da NASA pode ser observado na Figura 2.13 [10].

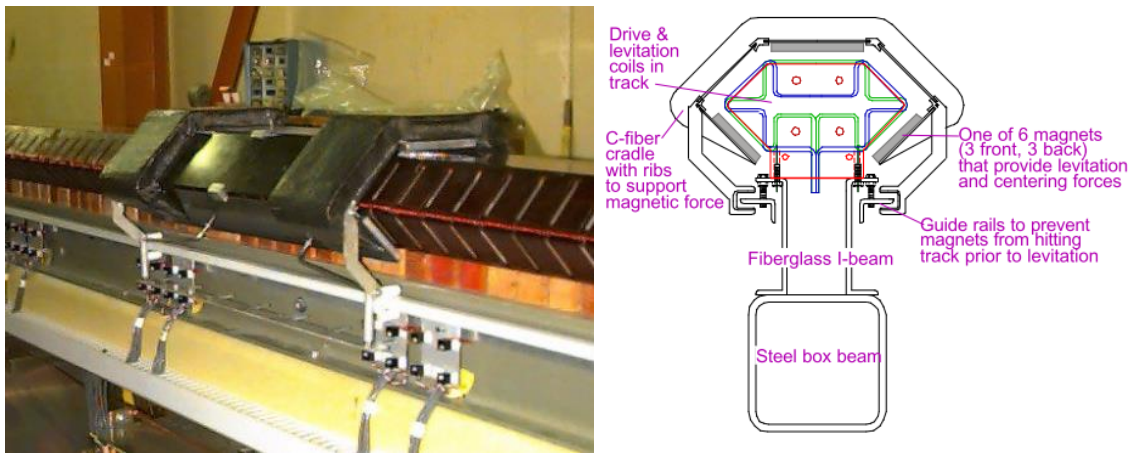


Figura 2.13 Protótipo para a NASA[13]

2.2. Sistemas de Transporte Industriais

2.2.1. *MagneMover Lite*

O *MagneMover LITE*, criado pela empresa *Magnemotion*, é um sistema de transporte inteligente e acessível especialmente desenvolvido para ser rápido, com movimentos precisos para o posicionamento e monitorização de cargas pequenas e leves. Perfeito para ambientes limpos, como salas limpas, este sistema aumenta o rendimento e eficiência de muitas aplicações incluindo a indústria farmacêutica, enchimento estéril, empacotamento de produtos alimentares, automação de laboratório, equipamentos médicos e produção de produtos de consumo [14].

Este sistema utiliza motores lineares síncronos, e tecnologia de controlo, oferece uma superior alternativa a convencionais correias, caixas redutoras em aplicações em que os requisitos de transporte são exigidos.

O sistema permite até nove veículos em movimento por metro, até doze veículos em fila por metro, cargas até um quilo por cada veículo, cargas de um quilo até dois quilos por conjunto de veículos, permite velocidades até dois metros por segundo e acelerações até 2 m/s^2 , suporta “*Track and Trace*”, operação limpa com poucas partes móveis [14].

Fácil e rápido de configurar, através de um sistema modular e ferramentas de *software* para ajustar a mudanças de *layout*, pela Figura 2.14 é possível observar o sistema.



Figura 2.14 MagneMover Lite [14]

Caraterísticas como movimentação inteligente permitem posicionamento preciso, deslocamento bidirecional, movimentos suaves, contínua deteção e relatório do estado do veículo. A pista do *MagneMover Lite* é um eixo controlado de movimento, onde pode ser sincronizado com braços robóticos, eliminando um dos eixos em muitos casos. Este sistema pode sincronizar o seu movimento com um sistema externo de precisão igualando a velocidade e posição.

Devido a cada veículo ter um único ID é possível saber a todo o tempo onde cada veículo se encontra, e capacidade de priorizar o encaminhamento de transportadores individuais.

2.2.2. *QuickStick*

O *QuickStick*, criado pela empresa *Magnemotion*, é baseado na tecnologia de motor linear síncrono. Este sistema existe em módulos LSM de um metro e meio metro, criam uma força eletromagnética para propulsionar os veículos e cargas através de montagem automatizada e sistemas de processamento. Os módulos são colocados de uma ponta a outra para criar um sistema de transporte e posicionamento onde pode ser integrado em aplicações de fabrico ou servir de plataforma para linhas de montagem para a próxima geração [14]. Na Figura 2.15 é possível observar o sistema de controlo e transporte.

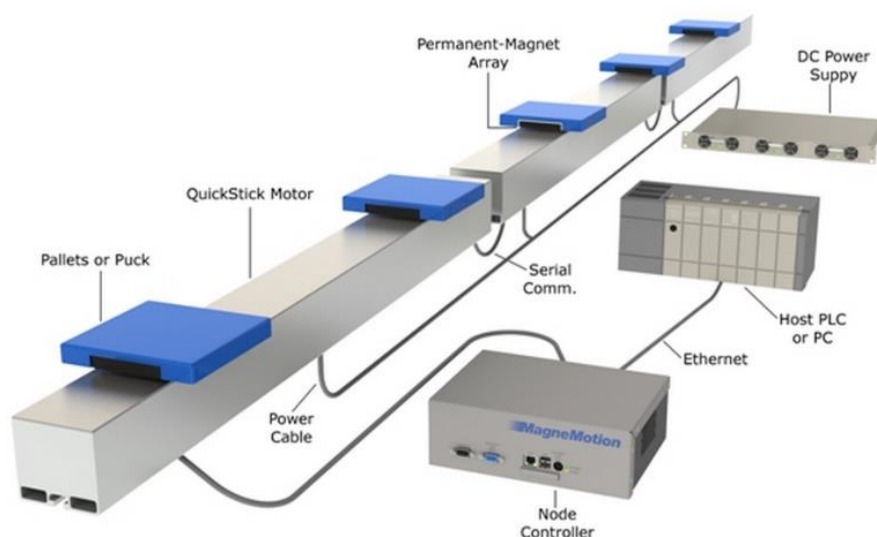


Figura 2.15 Layout QuickStick [14].

Usando sensores de posicionamento embebidos e *software* de controlo, o sistema *QuickStick* impulsiona e controla cada veículo independentemente pela interação com o conjunto de ímanes permanentes montados na pista. Permissões são pedidas e garantidas em milissegundos levando a movimentos suaves e contínuos num caminho sem obstáculos. Este sistema regula a velocidade e a aceleração dos veículos baseados nos limites especificados na ordem e configuração do sistema [14].

O sistema *QuickStick* existe em duas aplicações *QuickStick HT* e *QuickStick 100*. O *QuickStick HT* para aplicações de alta velocidade e cargas maiores, cargas até 4500 quilos, até dois veículos por metro, velocidades até 2.5 metros por segundo, acelerações para além de 4G (dependente da massa), sensores de posicionamento embebidos [14]. O *QuickStick 100* é específico para cargas pequenas ou médias até 100 kg, até cinco veículos por metro de pendente do conjunto de ímanes que podem ir de 150 mm até 966 mm, velocidades até 2.5 metros por segundo e acelerações para além de 1G (dependente da massa) [14].

Este sistema é ideal para ambientes industriais limpos e agressivos, posicionamento em malha fechada e identificação (ID), o sistema modular permite curvas, comutação e menos eixos de robôs.

O sistema permite o transporte e posicionamento de uma gama elevada de cargas, assim como manipular e controlar simultaneamente diferentes cargas de diferentes pesos.

2.3. Outras aplicações

Sistemas para além dos sistemas de transportes terrestres e industriais que foram estudados na secção anterior existem e estão em desenvolvimento. Nesta secção serão estudados algumas dessas aplicações, de forma a identificar possíveis soluções para o projeto que será elaborado.

2.3.1. Levitação de uma esfera de aço

Este sistema de levitação magnética é utilizado para manter uma esfera de aço com levitação estável em uma zona de operação programada. O sistema implementado consegue isto através do uso de um eletroímã que produz forças que suportam o peso da esfera.[15]

Este sistema regula a corrente aplicada ao eletroímã através do sistema de controlo. Este controlador toma decisões baseadas na leitura do sensor de posição, que indica a posição vertical da esfera.

O sistema desenvolvido consiste em uma bancada de teste com um controlador. Esta bancada de teste contém um atuador eletromagnético, um sensor ótico para deteção da posição, um amplificador PWM para controlo do eletroímã, e duas fontes de alimentação de corrente contínua, como pode ser visto pela Figura 2.16 [15].

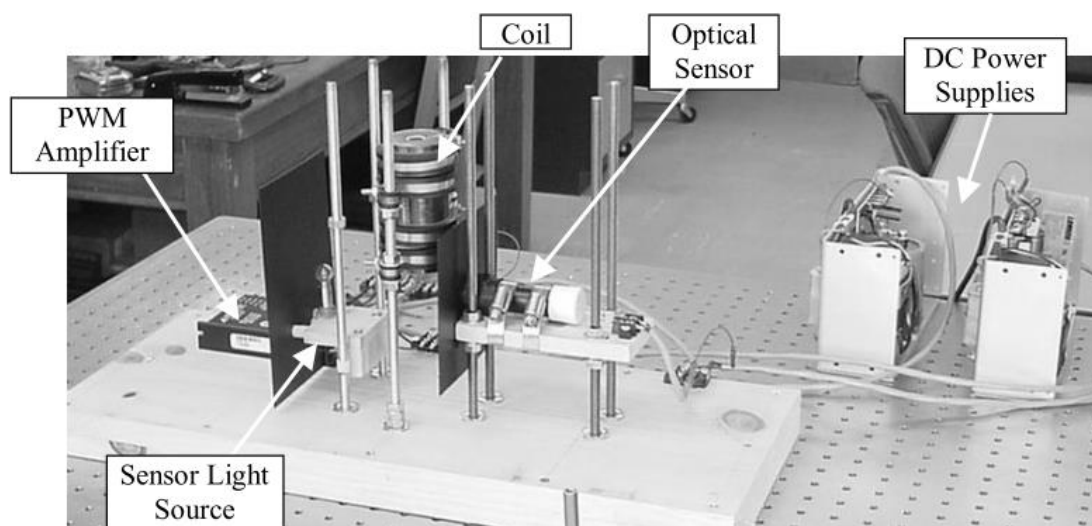


Figura 2.16 Bancada de teste do sistema de levitação.[15]

Para o sistema de posição, uma fotocélula é usada em conjunção com uma lâmpada incandescente. O deslocamento vertical da esfera é medido pelo sensor, através da exposição gradual da fotocélula à luz. Para assegurar que a luz ambiente não afeta as

leitura do sensor é colocado um tubo à volta da fotocélula. Esse tubo está completamente fechado à luz externa exceto a uma ranhura vertical localizada na ponta do tubo perto da esfera (Figura 2.17) [15].

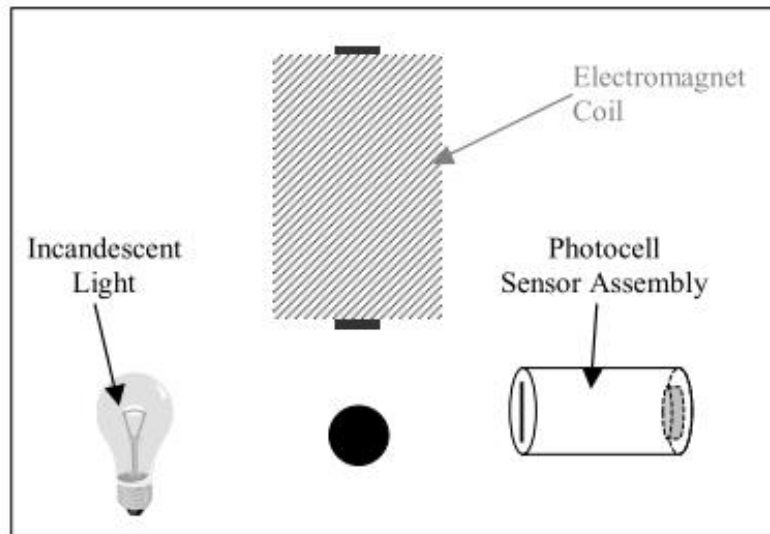


Figura 2.17 Posicionamento do sensor ótico [15].

A ranhura permite que a fotocélula seja exposta à luz da lâmpada incandescente. A variação da luz exposta à fotocélula resulta na variação da resistência elétrica, que é convertida para uma tensão elétrica por circuito elétrico para posteriormente ser recebida pelo controlador. Para prevenir que a luz ambiente interfira nas condições de leitura, são utilizados escudos de luz colocados à volta do sensor.

O atuador do sistema composto pelo eletroímã formado através do enrolamento do núcleo magnético de alta permeabilidade com um fio elétrico, cria um campo magnético quando uma corrente elétrica passa pelo enrolamento. Este campo magnético cria uma força atrativa para cima em qualquer objeto magnético colocado por baixo dele. O sensor de posição deteta a posição vertical do objeto e passa a informação ao controlador. O controlador então ajusta a corrente do eletroímã para que a posição do objeto seja a mesma que a posição de referência programada pelo utilizador do sistema [15].

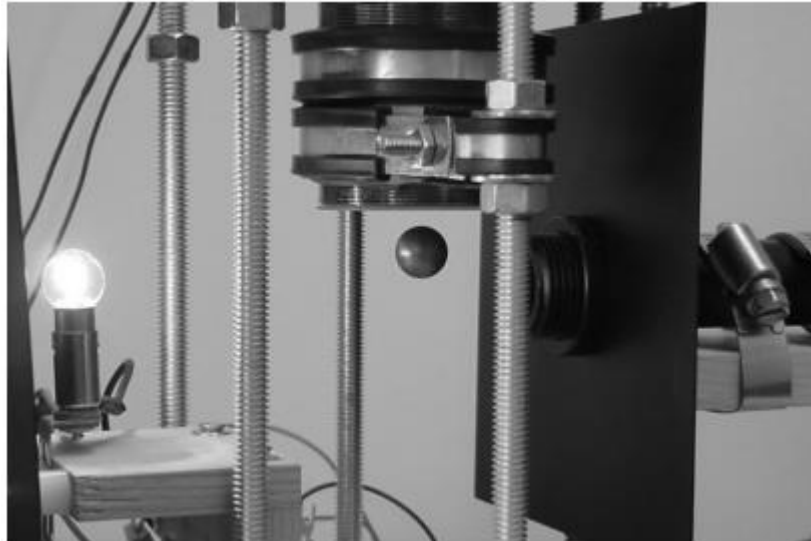


Figura 2.18 Levitação estável da esfera [15].

Através do uso de modelos e requerimentos para um sistema estável, é implementado um sistema de controlo que satisfaz os requerimentos de estabilidade. Dentro das várias opções de controlo foi escolhido um sistema de malha fechada, com *feedback* fornecido através do sensor ótico de posição (Figura 2.18).

2.3.2. Rolamentos magnéticos

Rolamentos magnéticos ativos estão a substituir rolamentos lubrificados em diversas aplicações. Os benefícios de usar rolamentos magnéticos incluem maior fiabilidade com pouca ou nenhuma manutenção, redução da vibração da maquinaria, aumento da eficiência geral mecânica dos equipamentos devido à redução das perdas por fricção, operação dos equipamentos a altas velocidades, imersão dos rolamentos em processo de fluidos reduzindo a eliminação de fugas, redução dos custos de instalação com a eliminação de óleos lubrificantes [16].

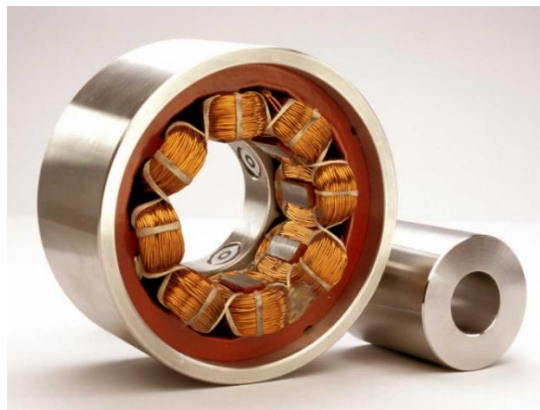


Figura 2.19: Rolamento Magnético - SRG Bearing [17].

Rolamentos magnéticos estão em serviço em aplicações industriais como a geração de energia elétrica, refinação de petróleo, máquinas ferramenta. Também são usados em centrifugadores do tipo *Zippe* utilizado para o enriquecimento de urânio[17]. São também usados em bombas turbo moleculares, onde rolamentos lubrificados seriam uma fonte de contaminação. Rolamentos magnéticos são usados em armazenadores de energia FLYWHEELS para permitir operação de alta velocidade em vácuo, bombas de sangue para aumentar a fiabilidade e biocompatibilidade.

Rolamentos magnéticos são projetados usando eletroímãs e ímãs permanentes. Rolamentos magnéticos baseados em eletroímãs são referidos como rolamentos magnéticos ativos.

Um rolamento magnético ativo trabalha com o princípio de suspensão eletromagnética e consiste de um conjunto de eletroímãs, um conjunto de amplificadores de potência que fornecem corrente para os eletroímãs, um controlador, e sensores de *gap* com eletrónica associada para fornecer o *feedback* necessário para controlar a posição do rotor, assim permite controlo ativo do amortecimento das vibrações do rotor.

O sistema de rolamentos magnéticos pode ser implementado em sistemas já em uso no mercado para aumentar a sua eficiência geral. Um destes casos é a implementação em sistemas de turbinas eólicas, como a turbina eólica Maglev da Figura 2.20.

As turbinas eólicas tradicionais apresentam elevadas perdas de fricção quando roda. É reportado em vários estudos que turbinas a levitar magneticamente aumentariam a produção de energia em cerca de 20 por cento comparado com turbinas tradicionais. Estas turbinas em comparação com um parque eólico com turbinas tradicionais para a mesma capacidade permitiriam uma redução nos custos de construção e um aumento de produção por área. Assim reduzindo os preços da energia eólica [1].



Figura 2.20 Turbina eólica Maglev [1]

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo será elaborado um resumo dos principais conceitos de diferentes domínios necessários para a realização do projeto. Este capítulo começa pela introdução da temática nuclear do trabalho, o eletromagnetismo, explicando as leis que o regem, e as propriedades dos materiais onde está inserido. No final será abordado o protocolo de comunicação para o sistema de controlo, de forma a compreender os conceitos associados.

3.1. Eletromagnetismo

A teoria do magnetismo foi desenvolvida independentemente da teoria de eletricidade até que Oersted, em 1820, mostrou que as duas áreas estão relacionadas. Esta relação foi depois explorada por Ampere, Faraday e Maxwell.

O eletromagnetismo está na origem do princípio de funcionamento de diversos equipamentos com que estamos em contacto nos dias de hoje. Assim, este tem um papel fundamental no desenvolvimento deste projeto, uma vez que os conhecimentos em eletromagnetismo são essenciais para perceber o princípio de funcionamento de eletroímãs e aos princípios de levitação magnética.

3.1.1. Lei de Gauss

Esta lei, formulada pelo matemático e físico Johann Carl Friedrich Gauss em 1835 dita que o integral de área de um campo elétrico E em qualquer superfície fechada dS é igual à carga Q dividida pela permissividade do vácuo ϵ_0 . [18]

$$\int E \, dS = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

A lei de Gauss afirma que as linhas de campo elétrico E tem o sentido de cargas positivas para cargas negativas. As linhas de campo elétrico começam e acabam em

cargas elétricas. Também que cargas elétricas opostas se atraem e caso contrário repelem-se.[19]

Quando a simetria o permite a forma integral da lei de Gauss oferece um método poderoso para calcular campos elétricos.

3.1.2. Lei da Força de Lorentz

Para além de produzir campos magnéticos, correntes elétricas experienciam uma força na presença de um campo magnético. Por exemplo, a corrente em um fio produz um campo magnético que causa a corrente no outro fio a experienciar uma força. Esta força magnética entre dois fios com corrente foi investigado em 1820 e 1830 por Gauss e André-Marie Ampère. [18] A formulação dando a força numa partícula com carga Q movendo-se com uma velocidade v por um campo elétrico E , e campo magnético B , é denominada força de Lorentz.

$$F = Q(E + v \times B) \quad (3.2)$$

Em um domínio do espaço se existir uma força exercida em um elemento com corrente, ou uma carga móvel, podemos dizer que um campo magnético existe nesse domínio.

3.1.3. Lei de Biot-Savart

A lei de Biot-Savart descreve como um campo magnético pode ser produzido por uma corrente elétrica constante num fio condutor

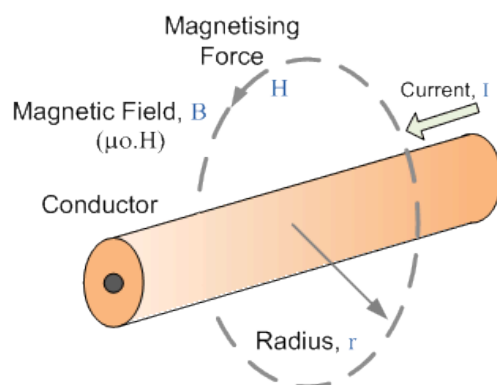


Figura 3.1 Circulação do campo magnético ao longo de uma corrente [20].

Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, um campo magnético circular é gerado à sua volta. A direção de rotação do campo magnético é governada pela direção da corrente no condutor com o correspondente campo magnético produzido

mais forte perto do centro do condutor e mais fraco longe dele, como mostra a Figura 3.1. [21]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{\vec{u}_r d\vec{l}}{r^2} \quad (3.3)$$

Assim a lei de Biot-Savart (Equação 3.3) permite a determinação do campo magnético B num ponto produzido por um condutor dl . Onde I é a corrente elétrica, u_r é o vetor direção do fio até ao ponto no campo e a constante μ_0 é chamada de permeabilidade magnética no vázio (Equação 3.4).

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (3.4)$$

3.1.4. Lei de Ampere

A lei de Ampere afirma que o integral de linha do campo magnético B à volta de um caminho fechado circular centrado e no plano perpendicular ao condutor, é igual a μ_0 vezes a corrente I a fluir no condutor [21].

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \quad (3.5)$$

Em 1826 Ampere demonstrou a Equação 3.5 é válida para qualquer condutor, disposto em malha fechada.

3.1.5. Lei de Faraday

Em 1831 Michael Faraday reportou um conjunto de experiências representadas na Figura 3.2. Pela experiência da Figura 3.2 (a), a deslocação de uma espira de fio por um campo magnético, verificou uma corrente a percorrer na espira. Pela experiência da Figura 3.2 (b), a deslocação de um íman permanente para a esquerda, uma corrente foi novamente induzida na espira. Pela experiência da Figura 3.2 (c), com a espira e o ímane permanente em repouso, alterou a força do campo magnético através de um eletroímã, e novamente uma corrente fluiu pela espira.

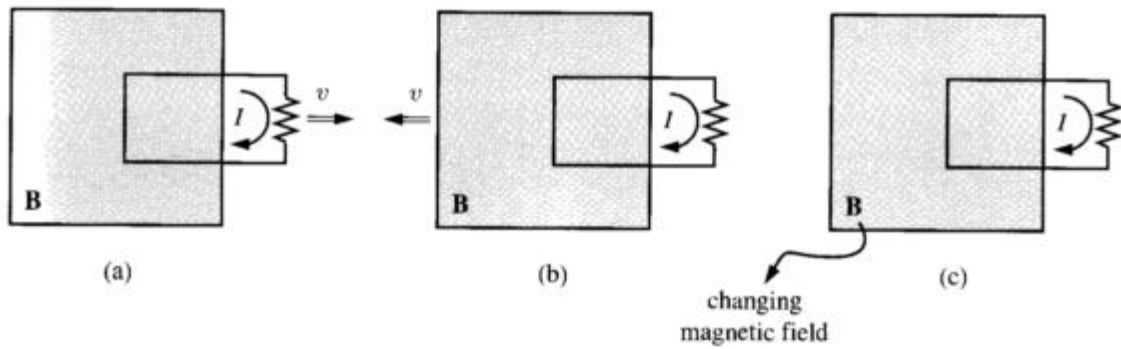


Figura 3.2 Experiências executadas por Michael Faraday.[21]

A alteração no fluxo pode ser produzida através da variação da força do campo magnético, através da aproximação ou afastamento de um ímã permanente de um indutor, aproximando ou afastando o indutor do campo magnético, ou rodando o indutor relativamente ao ímã permanente.

A lei de Faraday é possível determinar que se uma corrente elétrica origina um campo magnético então um campo magnético pode originar uma corrente elétrica. Se um campo elétrico variável no espaço dá origem a um campo magnético variável no tempo então um campo magnético variante no tempo pode originar um campo elétrico no espaço.

$$\int E \, dl = - \int \frac{\partial B}{\partial t} \, da \quad (3.6)$$

A lei de Faraday de indução eletromagnética demonstrou que se o fluxo ligado a um circuito é alterado de qualquer forma, então uma força eletromotriz é induzida no circuito cuja magnitude é proporcional à taxa de variação do fluxo ligado ao circuito[22].

3.1.6. Equações de Maxwell

Em 1873 James Clerk Maxwell publicou que as ondas eletromagnéticas podem existir independentemente do sistema de condutores e podem viajar através do espaço livre. Esta conclusão é a fundação com que a teoria de eletromagnetismo moderna está construída [22].

Lei de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$	(3.7)
--------------	---	-------

Lei de Gauss do Magnetismo	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	(3.8)
----------------------------	-------------------------------	-------

$$\text{Lei de Faraday} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\text{Lei de Ampere com} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.10)$$

correção de Maxwell

Um campo magnético nunca começa ou acaba em um ponto mas em vez disso forma uma volta completa, isto é o equivalente matemático a que a divergência $\nabla \cdot$ do campo magnético \mathbf{B} é zero. Esta propriedade é denominada lei do Gauss do magnetismo que é equivalente à afirmação que não existe polos magnéticos isolados ou monopolos magnéticos. Por sua vez o campo elétrico começa e acaba em cargas elétricas, logo a divergência do campo elétrico é diferente de zero e proporcional à densidade de carga ρ . [19]

A segunda propriedade das equações de Maxwell é denominada de *curl*, representa, como por exemplo $\nabla \times \mathbf{E}$ como o campo elétrico \mathbf{E} circula à volta de um determinado ponto.

Neste formato as equações de Maxwell especificam a divergência e circulação do campo elétrico \mathbf{E} e magnético \mathbf{B} . estas reforçam a noção que campos elétricos podem ser produzidos por cargas ρ ou por campos magnéticos variáveis no tempo $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$, e campos magnéticos podem ser produzidos por correntes \mathbf{J} ou por campos elétricos variáveis $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$. Em última análise é possível atribuir a causa dos campos magnéticos às cargas e correntes. As equações de Maxwell demonstram como cargas produzem campos e mutuamente a lei da força de Lorentz demonstra como os campos afetam as cargas.[21]

Estas quatro equações conjuntamente com a força de Lorentz formam o sumário do conjunto fundamental da teoria eletrodinâmica. Nos dias de hoje levaram a aplicações como os rádios, televisão, telemóveis e radares

3.1.7. Campo magnético em Bobinas

Um condutor longo em forma de bobina pode ser usado para gerar um campo magnético uniforme e similar ao de um ímã permanente. O campo magnético é concentrado num campo praticamente uniforme no centro da bobina, enquanto o campo magnético no exterior é mais fraco e divergente.[23]

$$B = \mu \frac{N}{L} I \quad (3.11)$$

A lei de Ampere permite calcular o campo magnético produzido no centro de uma bobina através da Equação 3.11. Esta pode ser simplificada na Equação 3.12, onde N representa o numero de espiras e I a corrente aplicada.

Para aumentar a força do campo magnético é necessário, como pode ser observado pela Equação 3.12, o aumento do número de espiras na bobina, através do enrolamento do fio em varias camadas, ou com o aumento da corrente aplicada.

$$B = \mu N I \quad (3.12)$$

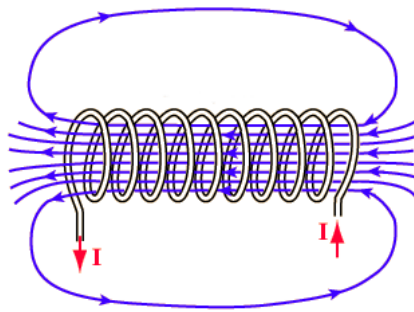


Figura 3.3 Esquema das linhas de campo numa bobine [23]

Uma bobina por si, como a da Figura 3.3, não produz um campo magnético forte. O campo magnético pode ser aumentado fortemente a partir da adição de um núcleo ferromagnético, como é o caso dos eletroímans.

3.1.8. Materiais ferromagnéticos

Uma maioria dos materiais que existem no mundo têm propriedades magnéticas que não diferem muito das do vácuo, para todos os propósitos de engenharia. A exceção a esta regra são elementos como o ferro, cobalto e o níquel. As suas propriedades especiais são ilustradas na Figura 3.4.

Na Figura 3.4 (a) esta representada um solenoide com núcleo de ar, com uma corrente I . a densidade de fluxo na vizinhança da solenoide. Vale ainda a pena salientar que não existiria qualquer alteração no campo magnético da solenoide se o núcleo fosse de bronze, alumínio, madeira, plástico, ou outro qualquer material não ferromagnético. Por outro lado se for colocado um núcleo de ferro, o resultado seria um considerável aumento na densidade de fluxo, como mostrado na Figura 3.4 (b) [22].

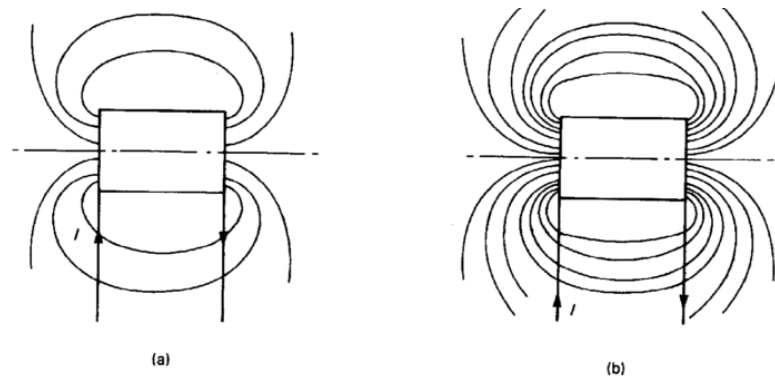


Figura 3.4 Campo magnético de uma bobina com núcleo de ar (a), bobina com núcleo de ferro. [22]

Esta propriedade do ferro é possível devido aos átomos do ferro serem pequenas fontes permanentes de fluxo magnético, como *loops* de corrente. Pela Figura 3.5 é possível observar a polarização dos *loops* através da representação destes por uma seta, de forma a dar uma explicação qualitativa dos materiais ferromagnéticos. Em uma peça de ferro não magnetizada os ímãs atômicos são organizados da cabeça à cauda da seta, em circuito fechado. Todo o fluxo circula dentro do ferro e nenhum para o exterior. O efeito de aplicar uma densidade de fluxo externa ao ferro causa os ímãs atômicos a alinhar-se com o fluxo externo, de modo a que o fluxo externo se adicione ao do ferro [22].

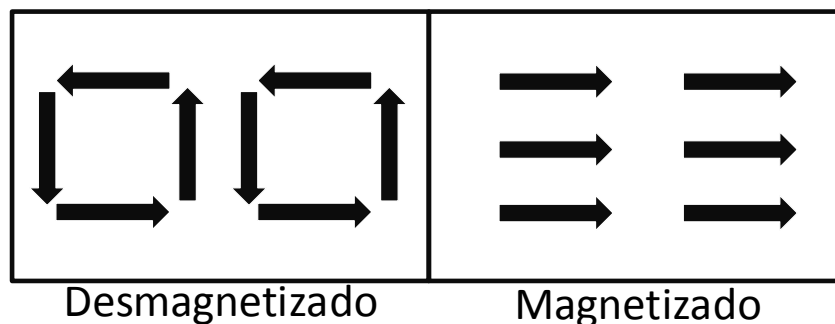


Figura 3.5 Polaridade do ferro.

3.1.8.1. Histerese

A magnetização do ferro depende não só da força magneto motriz atual mas também do histórico anterior do espécime.

Uma forma de investigar a relação entre a força magneto motriz aplicada a um espécime de ferro e a densidade de fluxo produzida, seria a utilização de um circuito magnético como o da Figura 3.6. desde que a folga seja muito pequena, para evitar fugas. O fluxo magnético na folga é o mesmo que no ferro e a sua força pode ser medida com a colocação de um sensor de Hall na folga.

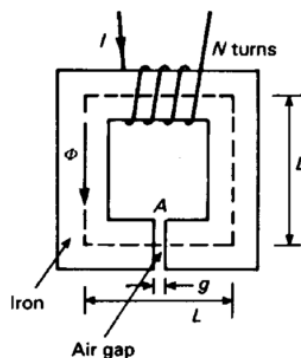


Figura 3.6 Circuito magnético com núcleo de ferro. [22]

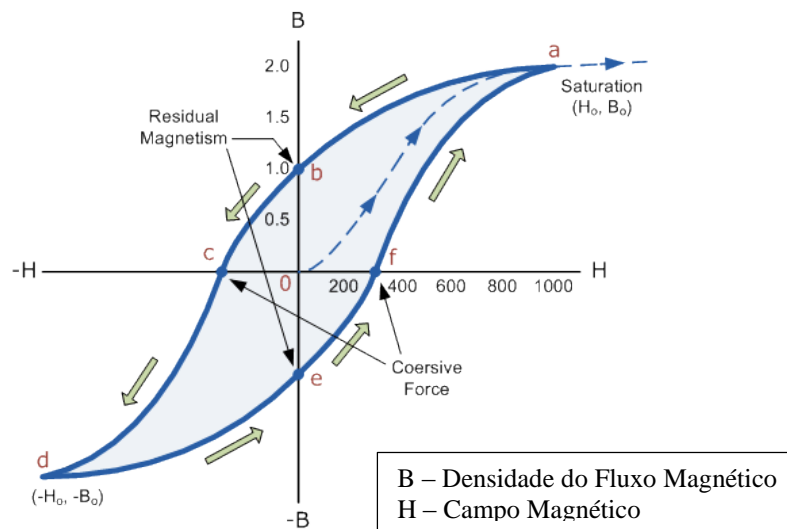


Figura 3.7 Curva da histerese magnética.[20]

A Figura 3.7 mostra uma curva B-H típica. Se o espécime de ferro está inicialmente desmagnetizado, então o seu estado pode ser representado pelo ponto 0 na origem do gráfico. Assumindo que a corrente nos enrolamentos da bobina é gradualmente aumentada, a curva B-H segue o caminho 0 para a, subindo lentamente no início, depois mais rapidamente, e finalmente, nivela saturando o material. Esta curva é conhecida como curva de magnetização inicial do ferro.

Se a corrente na bobina é reduzida para zero, a densidade de fluxo não retrai o caminho da curva 0a. A curva da densidade de fluxo magnético em vez disso segue a curva ab, logo o fluxo no circuito não desce para zero quando a corrente é zero. O valor de B no ponto c é referido como magnetismo residual.

De forma a reduzir o fluxo do circuito para zero é necessário inverter a corrente aplicada à bobina. O valor de H necessário para colocar o valor de B em zero (ponto c), é denominado por força coercitiva. Aumentando a corrente na bobina para além do nível necessário para alcançar o ponto c, eventualmente produz saturação do ferro no

ponto *d*. Finalmente reduzindo a corrente para zero e aumentando-a com polarização inversa produz a curva *defa*.

Se a corrente na bobina é repetidamente levada pelo mesmo ciclo, o ciclo de histerese *abcdef* é atravessada repetidamente de maneira estável, tendo em conta que o valor máximo de corrente em ambas as polaridades é o mesmo.

As propriedades magnéticas dos materiais podem ser alteradas, utilizando ligas com diferentes proporções de materiais. Podendo ainda ser fortemente influenciadas pela forma de acabamento do material, especialmente com tratamentos com calor. Agora existe uma variada quantidade de materiais. Pelo ponto de vista pratico a principal divisão entre materiais magnéticos é entre materiais macios e duros.

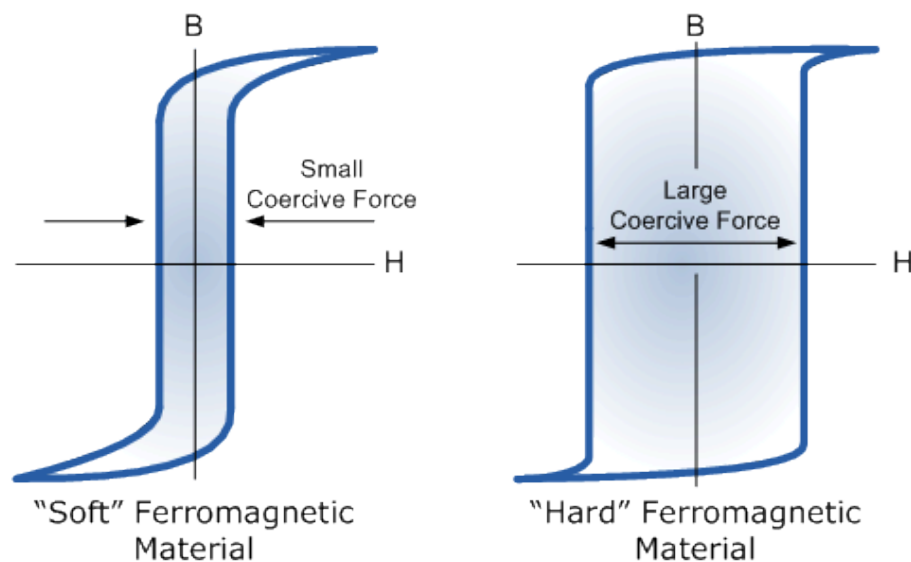


Figura 3.8 Ciclos de histerese para materiais duros e macios. [20]

Os materiais magnéticos macios são caracterizados por terem uma curva de histerese estreita, baixo magnetismo residual e baixas forças coercitivas. Assim são facilmente magnetizados e desmagnetizados, são usados como condutores de fluxo em circuitos magnéticos. Devido a estes materiais terem um ciclo de histerese estreito o seu comportamento pode ser aproximado ao da curva de magnetização inicial. Além disso se o ciclo é também linear para campos abaixo da saturação, é possível fazer a aproximação que a permeabilidade é constante.

Materiais magnéticos duros tem ciclos de histerese amplos, um elevado magnetismo residual e elevadas forças coercitivas. Estes materiais são difíceis de desmagnetizar. Estes são usados para a fabricação de ímanes permanentes e materiais para gravação magnética.[22]

3.1.9. Efeito de Hall

O efeito de Hall foi descoberto pelo Dr. Edwin Hall em 1879 enquanto era um candidato de doutoramento na Universidade *Johns Hopkins* em Baltimore. Dr. Hall descobriu que quando um ímã era colocado de maneira a que o seu campo fosse perpendicular a uma face de um fino retângulo de ouro por onde uma corrente fluía, uma diferença de potencial aparecia nas extremidades opostas. Ele descobriu que esta queda de tensão era proporcional à corrente que fluía pelo condutor, e ao campo magnético perpendicular ao condutor [24].

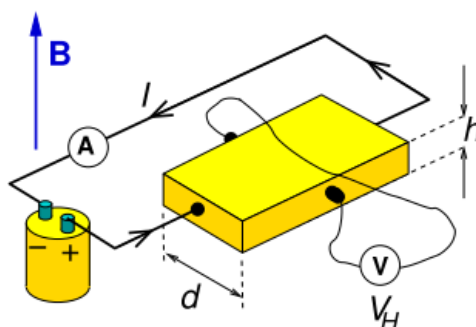


Figura 3.9 Geometria para calcular a tensão de Hall.[18]

A tensão de Hall V_H é dada pela Equação 3.13, onde I é a corrente que atravessa o comprimento do bloco, B é o campo magnético produzido, h é a espessura do bloco, q é a carga do eletrão e n_c a densidade de eletrões.

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n_c \cdot q \cdot h} \quad (3.14)$$

Embora hoje seja bastante comum, a tecnologia de efeito Hall ficou em laboratório até cerca de 1980. A principal razão deveu-se ao facto da tensão de Hall V_H quando sujeita a um campo magnético era muito baixa e facilmente influenciada por fatores externos, como a temperatura e ruídos [25]. Mais recentemente, com evolução da tecnologia de semicondutores, foi possível produzir tensões de Hall com uma ordem de magnitude maior que com materiais anteriores. Hoje em dia é possível usar sensores de efeito Hall em ambientes com condições extremas [25].

Comercialmente existem diversas variações de sensores de efeito de Hall, incluindo tanto com saída digital ou analógica.

Existem três variações comuns de ICs (*Integrated circuits*) de posição e nível digital, unipolar, *latching*, e bipolar. Interruptores unipolares a atuação é causada pelo campo magnético com força suficiente para ativar o dispositivo, uma vez que o campo

magnético é reduzido abaixo do ponto de desprendimento, o dispositivo passa ao estado “*off*”. ICs *latching* similares são unipolares, mas só podem ser desligados quando o dispositivo vê um campo magnético com polaridade oposta. Interruptores bipolares similares aos *latching*, em que usam polaridades opostas para ligar e desligar, mas devido à sensibilidade destes dispositivos não é garantida a operação como *latch*.

Apesar de, dispositivos de detecção de nível e posição, serem ideais quando só são necessárias poucas posições, este método torna-se dispendioso e um desafio para aplicações que necessitem de uma maior resolução. Para estas aplicações é possível utilizar dispositivos de efeito Hall lineares com saída analógica. [25].

Sensores analógicos oferecem uma tensão de saída proporcional ao campo magnético. Similares aos interruptores digitais existe uma abundância de recursos disponíveis, como, com saídas rácio-métricas, programáveis, saída digital (como PWM), e detecção unidirecional ou bidirecional [25].

3.2. Comunicação

3.2.1. RS-485

A EIA (*Eletronics Industries Association*), em 1983, aprovou um padrão de transmissão dominado RS-485. Encontrou posição e uso difundido em aplicações industriais médicas e aplicações de consumo, tornando-se no interface da indústria [26].

O padrão RS-485 fornece capacidade de comunicação multiponto para dispositivos com pelo menos um UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).

RS-485 é um protocolo de comunicação de baixo nível que fornece as regras básicas e a ligação física para troca de dados. Este padrão define as características elétricas dos *drivers* e recetores que são usados para implementar a linha de transmissão, permitindo a transmissão de mensagens em serie utilizando um barramento multiponto, enquanto o conteúdo da mensagem é completamente definido pelo utilizador [26]. Isto significa que a estrutura do quadro de comunicação, o esquema de endereçamento a outros nós, os mecanismos para evitar colisões de dados e outras tarefas tem de ser implementadas pelo programador na forma de protocolo de *software*.

A tabela seguinte sumaria as características principais do padrão [26] [27]:

Parâmetro	Valor
Modo de Operação	Diferencial
Número de Drivers e recetores	32 <i>Drives</i> , 32 Recetores
Comprimento máximo de Cabo (m)	1200
Taxa de transmissão máxima (bps)	10M
Tensão máxima em Modo Comum (Volts)	12 a -7

A norma RS-485 sugere que os seus nós sejam conectados em *daisy-chain* ou topologia de barramento. O barramento de interface pode ser projetado para transmissão *full-duplex* ou *half-duplex*, como pode ser observado na Figura 3.10 [26].

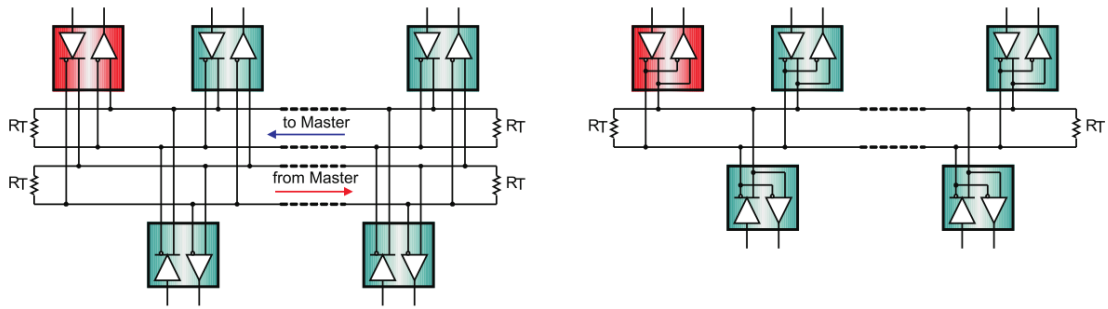


Figura 3.10 Estruturas de comunicação RS-485 [26].

A implementação em *full-duplex* necessita dois pares de sinais, quatro fios, e *transceivers full-duplex* com linhas de acesso ao barramento separadas para transmissão e receção. *Full-duplex* permite que um nó transmita dados em um par e receba no outro simultaneamente [26].

Em *half-duplex*, só um par de sinais é utilizado, forçando que a transmissão e receção ocorram em tempos diferentes. Ambas as implementações necessitam de controlo de operação de todos os nós através de sinais de controlo de fluxo, para assegurar que só um *driver* é ativado no barramento a qualquer momento. Existindo mais de um *driver* acedendo ao barramento ao mesmo tempo leva a uma colisão, que, deve ser evitada pelo *software* de controlo [26].

Os *transceivers* conforme a norma RS-485 fornecem uma saída diferencial. Os dois valores fornecem margem suficiente para uma transmissão fiável de dados mesmo sob uma severa degradação do sinal através dos cabos e conetores. Esta robustez é a principal razão porque RS-485 é bem adequado para redes de longa distância e ambientes ruidosos [26].

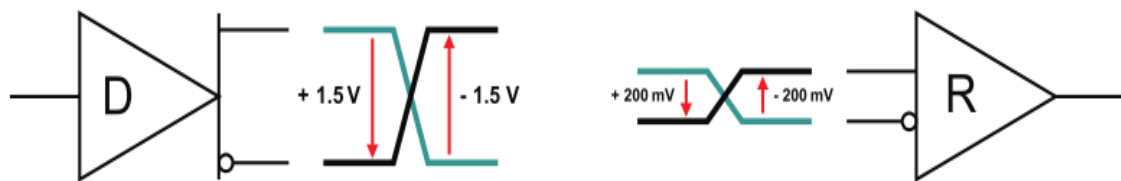


Figura 3.11 Sinais mínimos no barramento. [26]

Aplicações RS-485 beneficiam dos sinais diferenciais sobre cabo de par entrançado, pois o ruído de fontes externas é igual em ambas as linhas de sinal como o ruído de modo comum, o que é rejeitado pela entrada do recetor diferencial [26].

3.2.2. MODBUS

O protocolo MODBUS define a estrutura da mensagem que dispositivos iram reconhecer e usar, independentemente do tipo de rede sobre as quais comunicam. O protocolo descreve o processo pelo qual um dispositivo usa e solicita acesso a outro, como responde a pedidos de outros dispositivos, e como erros serão detetados e reportados [28].

Durante a comunicação o protocolo determina como cada dispositivo vai saber o endereço do dispositivo, reconhecer uma mensagem dirigida a ele, determinar o tipo de ação a ser tomada, extrair todos os dados ou outras informações contidas na mensagem. Se uma resposta for necessária, o dispositivo irá construir a mensagem de resposta e envia-la usando o protocolo MODBUS [28].

Dispositivos comunicação usando a técnica *master-slave*, onde só um dispositivo (o *master*) pode iniciar transições (denominadas “perguntas”). Os outros dispositivos (os *slaves*) respondem fornecendo os dados pedidos ao *master*, ou tomando a ação solicitada na pergunta [28].

O *master* pode endereçar os *slaves* individualmente, ou pode iniciar uma mensagem difundida (*broadcast*). Os dispositivos *slave* retornam uma mensagem (denominada de “resposta”) a perguntas que são endereçadas individualmente (Figura 3.12), não sendo enviadas respostas para perguntas difundidas pelo *master*, de forma a prevenir colisões de dados [28].

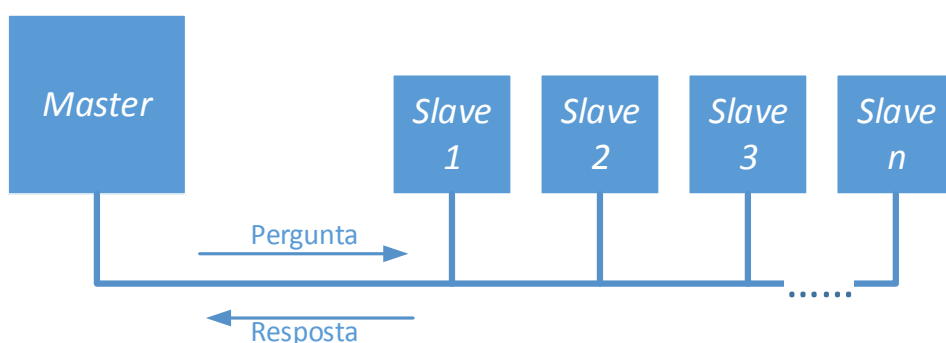


Figura 3.12 Transmissão entre dispositivos *master* e *slave*.

O protocolo MODBUS estabelece o formato para as perguntas do *master*, colocando nelas o endereço do dispositivo (ou endereço de difusão), um código funcional que define a ação pedida, dados a serem enviados, e um campo de verificação de erros. A resposta do *slave* contém a confirmação da ação, dados pedidos, e um campo de verificação de erros. Se um erro ocorrer na mensagem recebida, ou o *slave*

não consegue desempenhar a ação pedida, o *slave* irá construir uma mensagem de erro e envia-la como resposta [28].

Os dispositivos podem ser configurados para comunicarem em redes MODBUS usando qualquer um de dois modos de transmissão: ASCII ou RTU. Utilizadores selecionam o modo desejado, juntamente com os parâmetros de comunicação do porto serie (*baud rate*, paridade, etc.).

No modo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), cada comando de 8 *bits* é enviado em dois caracteres (por exemplo 0x03 é enviado o caracter 0 e depois o caracter 3). A principal vantagem deste modo é que permite intervalos de tempo até um segundo entre caracteres sem causar erro.

No modo RTU (*Remote Terminal Unit*), cada *byte* em uma mensagem contem dois caracteres hexadecimais de 4-bits. A principal vantagem deste modo é uma maior densidade de caracteres que permite transferências de dados melhores do que em ASCII para a mesma taxa de transmissão. Cada mensagem deve ser transmitida em um fluxo contínuo (Figura 3.13).

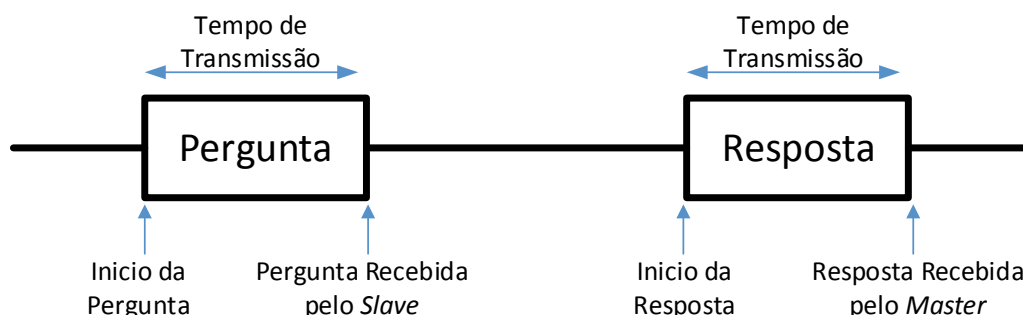


Figura 3.13 Esquema de comunicação do modo RTU.

No modo RTU, as mensagens iniciam com um intervalo silencioso de pelo menos o tempo equivalente à transmissão de 3.5 caracteres.

Quando o primeiro campo é recebido (o campo de endereço), cada dispositivo descodifica-o para saber se é o endereço dele.

No final do último caracter transmitido, um intervalo semelhante ao anterior, de pelo menos 3.5 caracteres, marca o fim da mensagem. A partir deste intervalo uma nova mensagem pode ser iniciada.

O quadro de dados deve ser transmitido em fluxo contínuo. Se um intervalo de 1.5 caracteres ocorrer antes de finalizar o quadro, o dispositivo de receção rejeita a

mensagem incompleta e assume que o próximo *byte* será o campo de endereço da próxima mensagem [28].

Semelhante, se uma mensagem começa antes de um tempo de 3.5 caracteres da mensagem anterior, o dispositivo recetor considera como continuação da mensagem anterior. Esta ação estabelece um erro, já que o valor do campo CRC não será valido para a combinação das mensagens [28].

O campo de endereço contém oito bits. Os endereços de *slaves* validos estão no intervalo de 0 a 247 decimal. Os endereços individuais dos dispositivos *slave* são atribuído na gama 1 a 247. Um dispositivo *master* endereça um dispositivo *slave* colocando o endereço do *slave* do campo de endereço. Quando um dispositivo *slave* responde, coloca o próprio endereço do campo de endereço da resposta, de modo a que o master perceba quem respondeu. O endereço zero é usado como endereço de *broadcast*, que todos os dispositivos *slaves* reconhecem [28].

O campo do código funcional do quadro de dados contém 8 bits. Códigos validos estão na gama de 1 a 255 decimal. Quando uma mensagem é enviada do dispositivo master para um *slave* o código funcional diz ao *slave* que tipo de ação deve executar [28].

Quando um *slave* responde, usa o código funcional para indicar quer uma resposta normal (sem erros) ou que algum erro ocorreu (chamada de resposta de exceção). Para uma resposta normal o *slave* simplesmente faz eco ao código funcional original. Para uma resposta de exceção, o *slave* transmite o código equivalente da função original com o bit mais significativo definido para o valor lógico 1 [28]. Na Figura 3.14 esta apresentado o quadro de dados completo para exceções

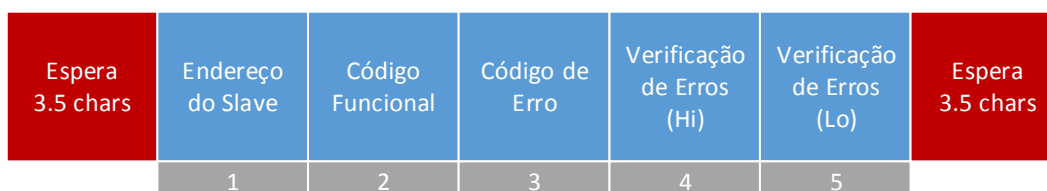


Figura 3.14 Quadro de dados para exceções

Em adição ao código funcional modificado, o dispositivo *slave* coloca um código único no campo de dados da mensagem. Isto indica ao *master* que tipo de erro ocorreu, ou a razão para a exceção [28].

O campo de dados é construído usando um conjunto de dois dígitos hexadecimais, no intervalo de 00 a FF. Por exemplo, se o master pede ao *slave* para ler

um grupo de registos (código funcional 0x03), o campo de dados especifica o endereço do primeiro registo e quantos registos serão lidos. Caso o *master* escreva para um determinado número de registos do *slave* (código funcional 0x10), o campo de dados especifica o endereço do primeiro registo, quantos registos irá escrever, a contagem do número de bytes a seguir no campo de dados, e os dados a serem escritos nos registos.

Na Figura 3.15 está apresentado o esquema de transmissão e receção de dados para uma mensagem do tipo escrita de um registo único no dispositivo *slave*.

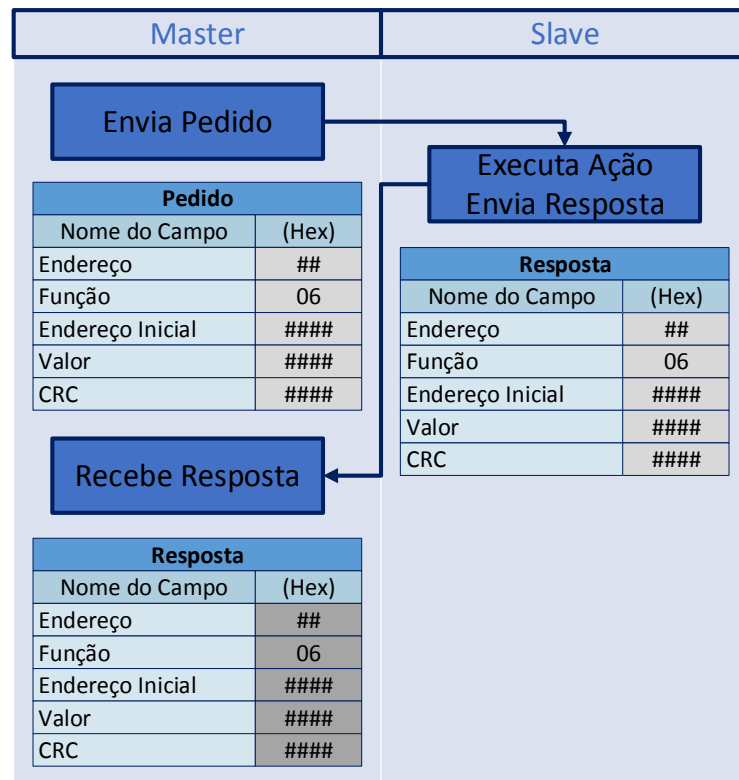


Figura 3.15 Descrição do processo de transmissão de uma mensagem

Se nenhum erro ocorrer, o campo de dados da resposta do *slave* para o *master* contém os dados pedidos. Se um erro ocorrer, o campo contém o código de exceção que a aplicação do master pode usar para determinar a próxima ação a tomar.

O campo de dados pode ser não existente (tamanho zero) em certos tipos de mensagem, onde o código funcional sozinho especifica a ação a tomar.

O *master* é configurado pelo programador para esperar um determinado tempo limite. O *master* espera por este período de tempo antes de decidir que o *slave* não vai responder e a transição deve ser abortada. Deve-se ter especial atenção na determinação do tempo limite para o *master* e *slaves*. O *slave* pode definir o “tempo de resposta” como o tempo desde a receção do último *bit* da pergunta até à transmissão do

primeiro *bit* da resposta. O *master* pode definir o “tempo de resposta” como o período entre a transmissão do primeiro *bit* da pergunta até à receção do último bit da resposta [27].

Redes MODBUS padrão usam dois tipos de processos para deteção de erros, o CRC (*Cyclic Redundancy Check*) e a verificação de paridade. O CRC verifica a integridade da mensagem, enquanto a verificação da paridade (impar ou par) pode ser aplicada a cada caracter na mensagem [27].

Os programadores podem configurar a verificação de paridade para par ou impar, ou sem paridade. Isto vai determinar como o *bit* de paridade vai ser definido par cada caractere. Se quer paridade par ou impar seja especificada, a quantidade de 1 *bits* irá ser contado na parte de dados de cada caractere. O *bit* de paridade irá então ser definido para 0 ou 1. Por exemplo, estes oito *bits* de dados estão contidos em um caractere o quadro RTU:

1001 1010

A quantidade total de *bits* com valor lógico 1 no quadro é quatro. Se for usada paridade par, o *bit* de paridade será colocado a 0, fazendo uma quantidade total de 1 *bits* ainda um número par (quatro). Se for usada paridade impar, o *bit* de paridade será colocado a 1, fazendo uma quantidade impar de 1 (cinco) [28].

Quando uma mensagem é transmitida, o *bit* de paridade é calculado e aplicado a cada caractere. O dispositivo de receção conta a quantidade de *bits* e define um erro caso eles não sejam iguais.

Se nenhuma paridade for especificada, o *bit* de paridade não será transmitido e a verificação não será executada. Neste caso um *bit* de *stop* adicional é transmitido para preencher o quadro do caractere [28].

No modo RTU o campo de verificação de erros contem um valor de 16 bits. O valor do CRC é calculado pelo dispositivo de transmissão, que anexa o CRC no último campo da mensagem. O dispositivo de receção recalcula o CRC durante a receção da mensagem, e compara o valor calculado com o valor recebido no campo CRC. Se os dois valores não forem iguais é originado um erro [28].

O campo CRC é anexado no último campo da mensagem, com o *byte* de baixa ordem anexado primeiro, seguido do *byte* de ordem mais elevada.

Capítulo 4

Estrutura Modular

Neste capítulo centra-se a atenção na análise do sistema de levitação e o estudo e simulação de soluções de implementação. Desta forma, procura-se encontrar a alternativa que melhor se adapte as exigências deste projeto.

4.1. Análise

Como abordado anteriormente este projeto é baseado num sistema de levitação magnética utilizando eletroímãs e ímãs permanentes para a levitação de uma janela deslizante.

O sistema de levitação magnético será aplicado no protótipo final com uma janela deslizante. Esta janela tem com dimensões as identificadas na Figura 4.1.

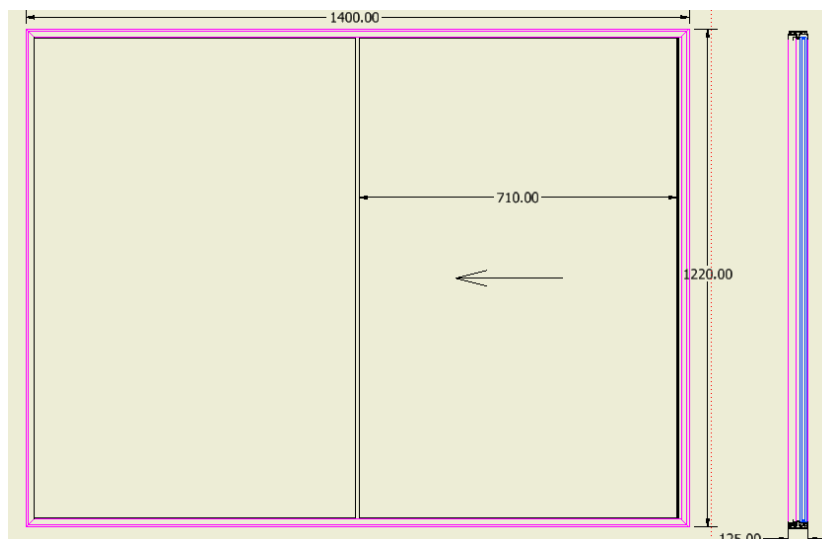


Figura 4.1 Dimensões da janela para protótipo final

Para o desenvolvimento do projeto é necessário ter em atenção as restrições das medidas finais do projeto para que a estrutura da janela não altere, ou seja, o protótipo terá que ser dimensionado para as medidas da janela. Assim temos restrições maiores na largura do modo e na profundidade visto que o comprimento terá de ser o da janela.

Analisando a janela fornecida, da Figura 4.1, foi possível especificar como eventualmente iria ser implementado, tendo em consideração a facilidade de montagem e manutenção.

Foi pensado um sistema modular, e que cada módulo é dimensionado para suportar um determinado peso, dependendo da janela em questão.

Atendendo ao facto da janela fornecida ter um comprimento de 1400 mm foi pensado módulos de 200 mm cada. Através do peso bruto da janela foi possível verificar qual a força necessária para o sistema conseguir levitação, tendo um peso bruto de 34 kg, e uma largura de 704 mm, e ao facto dos módulos serem de 200 mm cada é necessário distribuir o peso por 3,5 módulos, ficando cada módulo responsável de exercer uma força de pelo menos 10 kg.

Para o desenvolvimento do projeto foram escolhidos ímanes permanentes capazes de suportar a maioria do peso de forma a reduzir o consumo dos eletroímãs. Esta escolha foi efetuada com base na força e dimensões dos ímanes permanentes. Na Tabela 4.1 estão apresentadas as características dos ímanes que serão usados neste projeto.

Tabela 4.1 Características dos ímanes permanentes

Parâmetros	20 x 10 x 5	19,05 x 12,7 x 6,35
Material	NdFeB	NdFeB
Força [N]	37.3	63.6
Grau de Magnetização		N42
Temperatura Máxima de operação [°C]		80
Magnetismo residual B_r [T]		1,29 – 1,32
Força coercitiva H_c [kA/m]		860 – 955

Como foi visto no Capítulo 2, existem vários métodos que podem ser utilizados para conseguir um sistema de levitação magnética. Estes métodos podem ser por forças de atração, repulsão ou com a combinação dos dois métodos.

Atendendo às restrições com a geometria da janela serão executados testes com diferentes formatos, apresentados na Figura 4.2, de modo a conseguir uma implementação magneticamente estável.

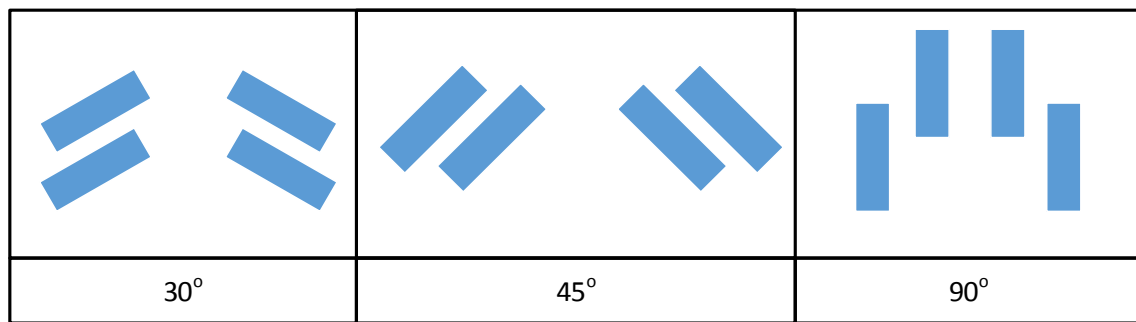


Figura 4.2 Formatos das geometrias do sistema de levitação

A partir dos formatos geométricos das estruturas com ímanes permanentes, foi elaborado um estudo para as diferentes topologias de eletroímãs, de forma a conseguir integrar o sistema eletromagnético na janela deslizante. Estes eletroímãs são responsáveis por manter o sistema de levitação estável, e se possível com um consumo energético reduzido.

4.2. Simulações das Topologias eletromagnéticas

Para comprovar a performance das diferentes configurações de eletroímãs, foi necessário a utilização de um programa de simulação. Após a caracterização dos programas de simulação disponíveis no mercado, foi escolhido o *software ANSOFT MAXWELL*, este é desenvolvido especialmente para trabalhar com campos magnéticos, com uma fácil caracterização dos materiais do sistema e desenho simples.[29]

O *software ANSOFT MAXWELL* é um programa interativo para análise de elementos finitos, para resolver problemas elétricos, magnetostáticos, correntes de *eddy*, e problemas transientes. Este *software* resolve problemas eletromagnéticos através da resolução das equações de Maxwell, numa região finita do espaço com apropriadas condições de fronteira e quando necessário, com condições iniciais definidas pelo utilizador de forma a obter soluções fiáveis.

Nesta fase foram simulados e construídos diferentes topologias de eletroímãs com dimensões que servissem as restrições da estrutura da janela. Foram assim simuladas varias topologias, sendo estas em topologia I (Figura 4.3 a)), topologia E (Figura 4.3 b)), e a junção destas com os ímanes permanentes.

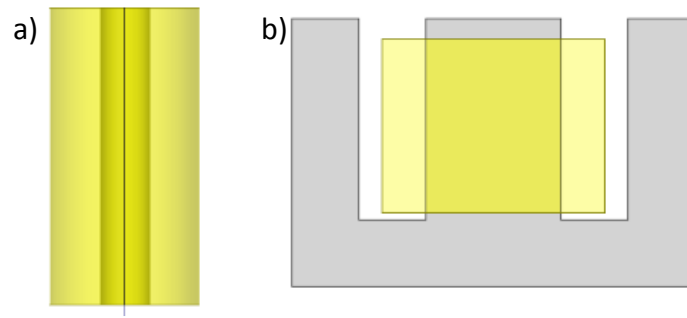


Figura 4.3 a) Eletroímã topologia, b) Eletroímã topologia E

De forma a identificar potenciais erros de simulação na caracterização dos materiais e parâmetros do sistema a analisar serão construídos para além da simulação protótipos da simulação de forma a comparar os resultados simulados com modelos reais até chegar ao modelo final.

4.2.1. Topologia I

Esta topologia foi estudada de forma a satisfazer as necessidades das estruturas magnéticas de 30 e 45 graus. Pela análise destas estruturas surgiu a necessidade de exercer uma força, contra uma das faces de um ímã permanente dos ímanes permanentes de forma a variar o *gap*, controlando assim a altura a estrutura móvel.

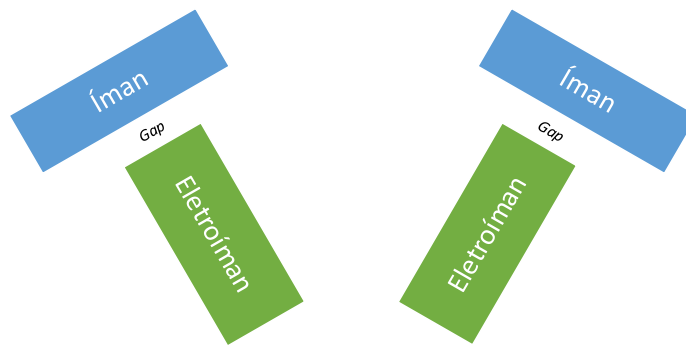


Figura 4.4 Configuração para topologia I

A topologia I produz dois polos magnéticos nas extremidades do núcleo ferromagnético, onde a intensidade do campo magnético é máxima no centro do núcleo e diminui à medida que se aproxima das extremidades, como é possível observar pela Figura 4.5.

Para produzir o campo magnético da Figura 4.5 foi simulado um eletroímã com as características presentes na Tabela 4.2 e aplicada uma corrente à indutância de 1 A.

Tabela 4.2 Parâmetros do fio para a indutância da topologia I

Parâmetros	Valor
Número de espiras	720
Diâmetro do fio de cobre [mm]	0.72
Resistência [Ω/km]	41.984 [30]
Comprimento de fio [m]	67.45

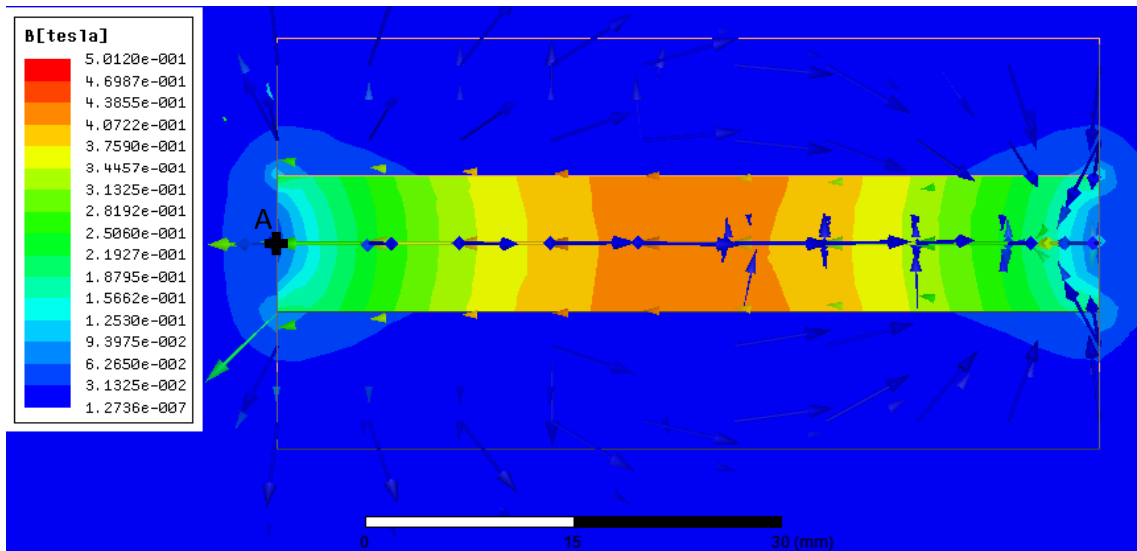


Figura 4.5 Simulação do campo magnético em Ansoft Maxwell.

Como intuito de verificar as consequências da variação do campo magnético com a variação da corrente foi elaborada a leitura do campo magnético na superfície do eletroímã no ponto A presente na Figura 4.5. Os resultados obtidos na Figura 4.6 mostram uma variação linear com o aumento da corrente, que será equivalente a um aumento da força produzida pelo eletroímã.

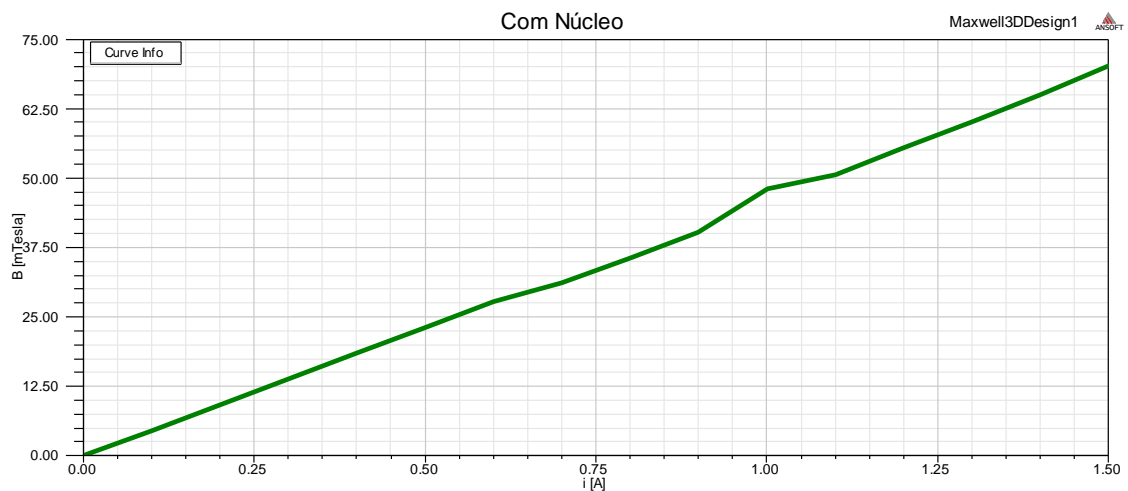


Figura 4.6 Simulação do campo magnético em função da corrente com núcleo.

Um outro fator importante nos eletroímãs é a natureza do núcleo. Para verificação do efeito deste, foi efetuada a simulação do mesmo eletroímã, mas sem o núcleo ferromagnético. Os resultados obtidos na Figura 4.7 mostram que a remoção do núcleo ferromagnético apresenta uma perda no campo magnético de aproximadamente igual a 6.5 vezes do campo com núcleo.

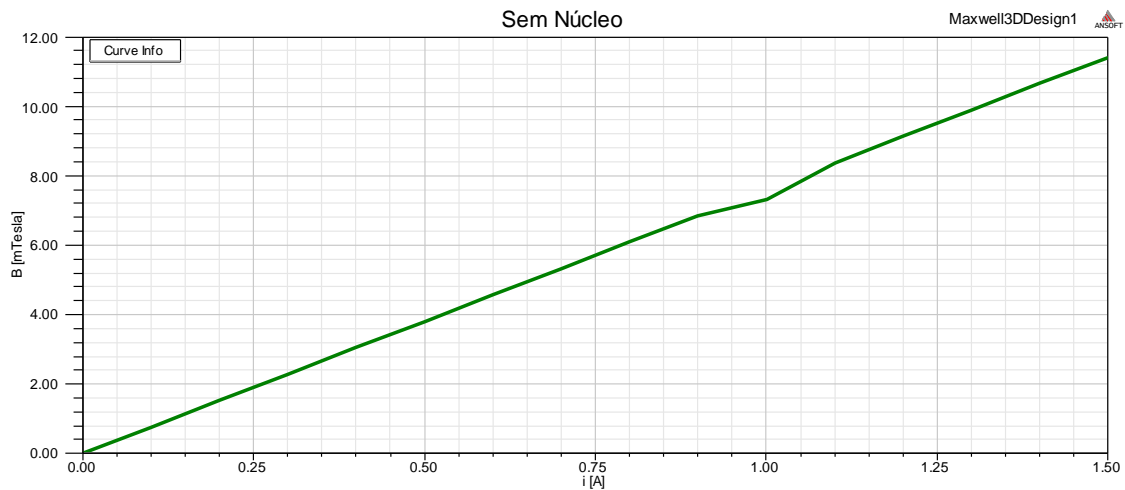


Figura 4.7 Simulação do campo magnético em função da corrente sem núcleo

Para a demonstração da força produzida pelo eletroímã, foi colocada em simulação um ímã permanente com o eletroímã em questão. Esta simulação foi executada com a variação da corrente aplicada à indutância do eletroímã e com a variação do *gap* entre o eletroímã e o ímã permanente.

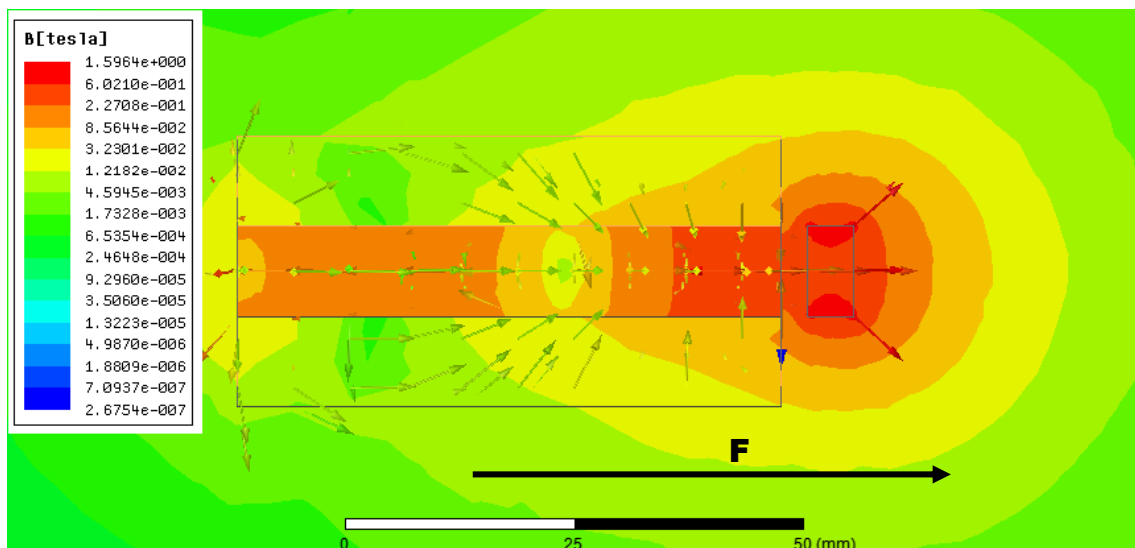


Figura 4.8 Simulação do eletroímã em topologia I com ímã permanente 20x10x5

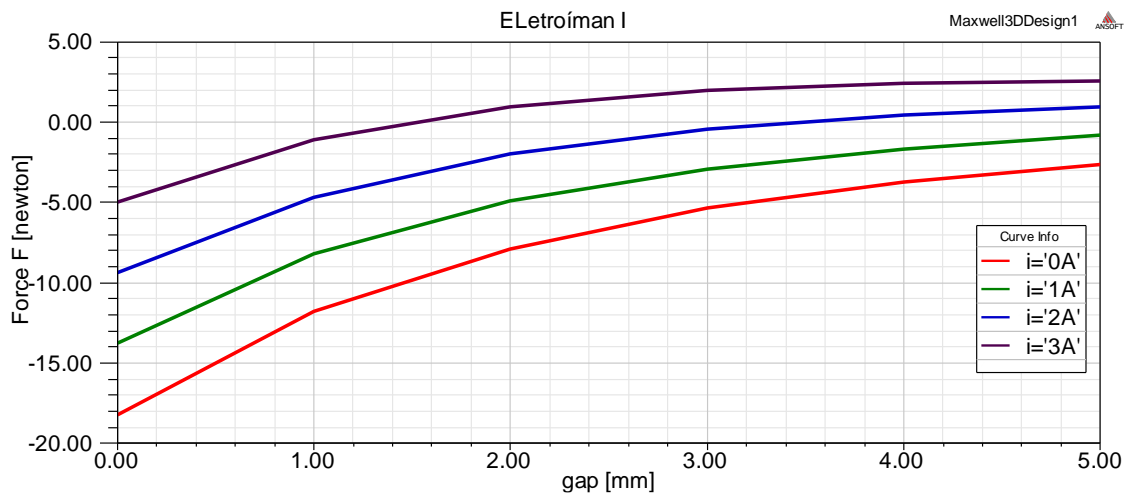


Figura 4.9 Variação da força no eletroímã de topologia I

Por observação dos resultados do gráfico da Figura 4.9 é possível identificar que quando o eletroímã se encontra desligado o ímã permanente cria uma força de atração com o núcleo ferromagnético do eletroímã. À medida que a corrente aplicada aumenta a força de repulsão produzida pelo eletroímã aumenta reduzindo a força de atração do ímã permanente no núcleo ferromagnético, até a anular.

Esta topologia é capaz de introduzir no sistema uma força de repulsão de cerca de 15 N para um pulso de corrente de 3 A. Contudo devido à topologia de ímanes permanentes em que o eletroímã seria colocado não seria o suficiente para elevar a janela devido às perdas de interação com o aumento do *gap* entre os ímanes permanentes da parte móvel com os ímanes da parte fixa.

4.2.2. Topologia E

O estudo desta topologia veio de encontro às necessidades da estrutura de 90 graus, nesta estrutura é necessário que o eletroímã seja capaz de exercer uma força de repulsão em dois ímanes permanentes ao mesmo.

O eletroímã a simular necessita de respeitar as restrições, de modo a se obter resultados o mais próximo possível da estrutura final. Com este fim foi dimensionado o eletroímã com as características da Tabela 4.3

Tabela 4.3 Parâmetros elétricos do eletroímã

Parâmetros	Valor
Núcleo ferromagnético	E 57 (chapa magnética)
Número de espiras	460
Diâmetro do fio de cobre [mm]	0.56

Resistência [Ω/km]	66.78[30]
Comprimento de fio [m]	60.2

A partir do desenho do eletroímã em Ansoft Maxwell foi simulado os campos magnéticos produzidos por este eletroímã, bem como a verificação da orientação das linhas de campo.

Pelos campos magnéticos da Figura 4.10, é possível verificar que o campo magnético é mais intenso no centro do bloco central e ao seu redor.

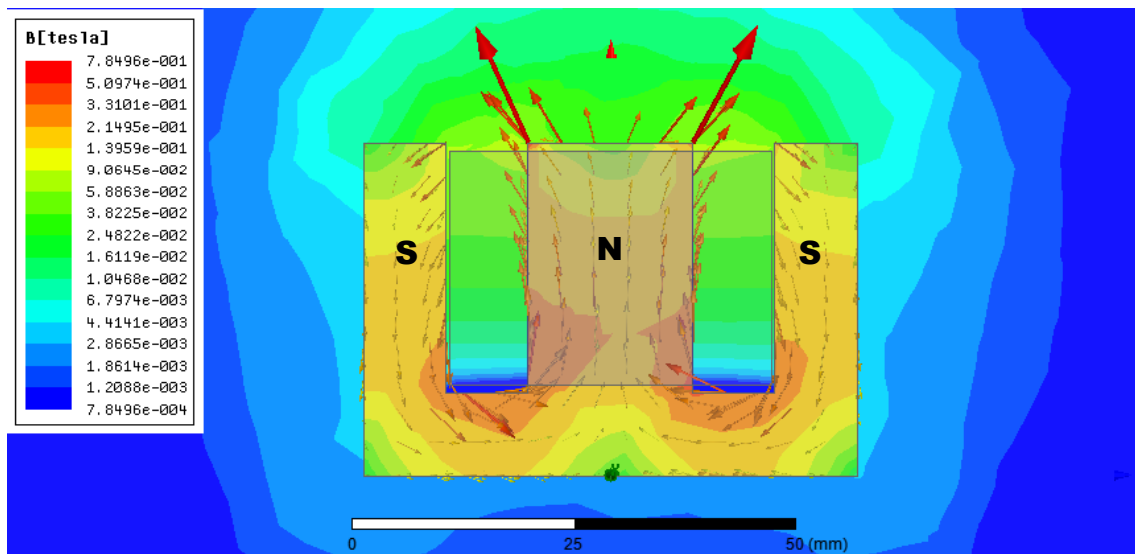


Figura 4.10 Simulação do campo magnético da topologia E com 1 A

O eletroímã simulado consegue criar um campo magnético, com maior intensidade na zona entre o polo norte e o polo sul, zona identificada no gráfico da Figura 4.11. esta zona será assim a zona ideal para a colocação dos ímãs permanentes.

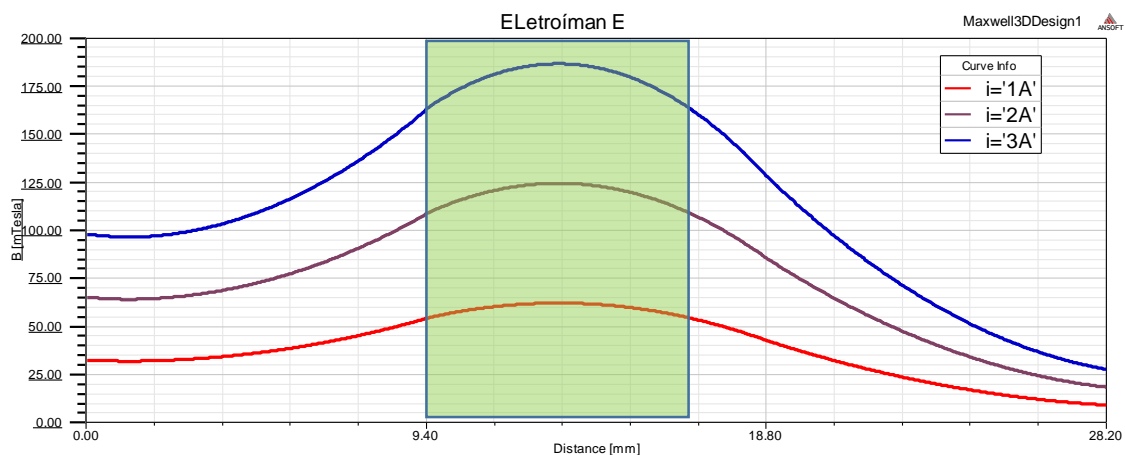


Figura 4.11 Gráfico do campo magnético em função da superfície do eletroímã.

A partir dos resultados do eletroímã com o núcleo E57 foram executadas simulações com diferentes dimensões de núcleos magnéticos, de forma a satisfazer as necessidades do projeto. Assim foi executada a leitura do campo magnético de diferentes núcleos ferromagnéticos com um enrolamento de 500 espiras, e com uma profundidade do núcleo ferromagnético de 25 mm.

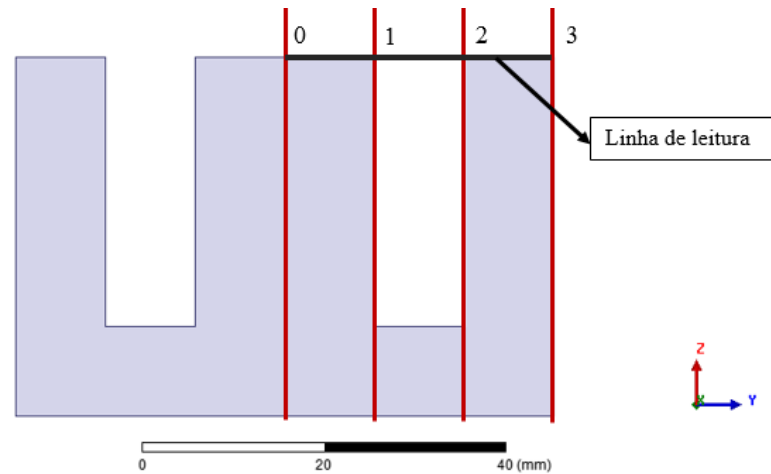


Figura 4.12 Diagrama de leitura

Na Figura 4.12 está apresentado o diagrama de leitura com os pontos de leitura presentes no gráfico da Figura 4.13. Os pontos de leitura são apresentados desta forma de modo a normalizar o gráfico apresentado, para as diferentes dimensões de núcleo ferromagnético.

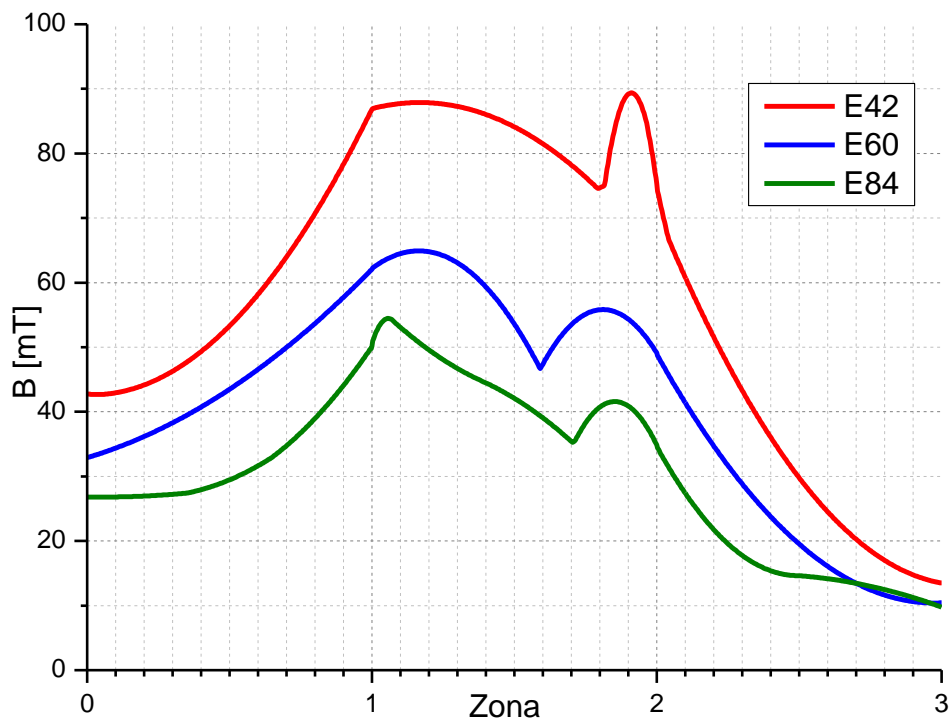


Figura 4.13 Comparação entre diferentes dimensões de laminções do tipo E

Pela análise dos resultados foi possível verificar que com o aumento das dimensões da área do núcleo ferromagnético o campo magnético para o mesmo NI (500 espiras e 1A) reduz, tendo maior campo com um núcleo ferromagnético mais reduzido. À medida que a área do polo reduz a intensidade do campo aumenta atingindo mais rapidamente a saturação do material ferromagnético. Tendo isto em conta é necessário obter a área ideal para manter a variação do campo magnético fora dos valores máximos de saturação.

Outro fator que é necessário para a escolha do núcleo ferromagnético é a quantidade de espiras e a corrente máxima a utilizar de modo a reduzir os custos em funcionamento, visto que a chapa magnética tem um *gap* fixo para a colocação na bobina.

Após a simulação dos valores dos campos magnéticos, foi elaborada a simulação, do comportamento do eletroímã na presença de ímanes permanentes. Para a colocação dos ímanes permanentes foi escolhida a localização através dos resultados da Figura 4.11, onde foi localizada a área de maior campo magnético. A partir dessa observação foi elaborada a simulação da Figura 4.14.

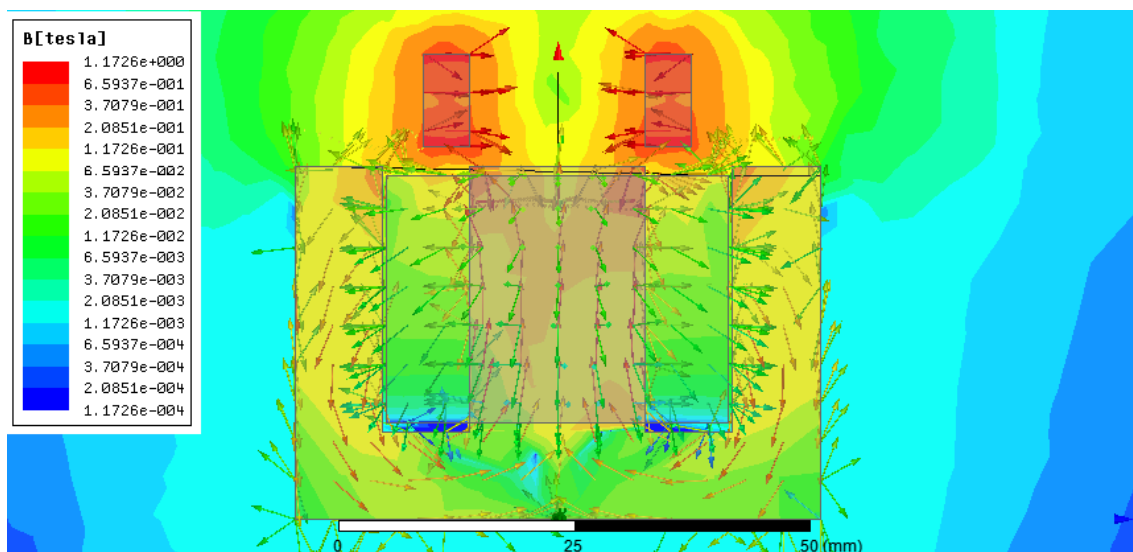


Figura 4.14 Campos Magnéticos do eletroímã de topologia E com ímanes permanentes.

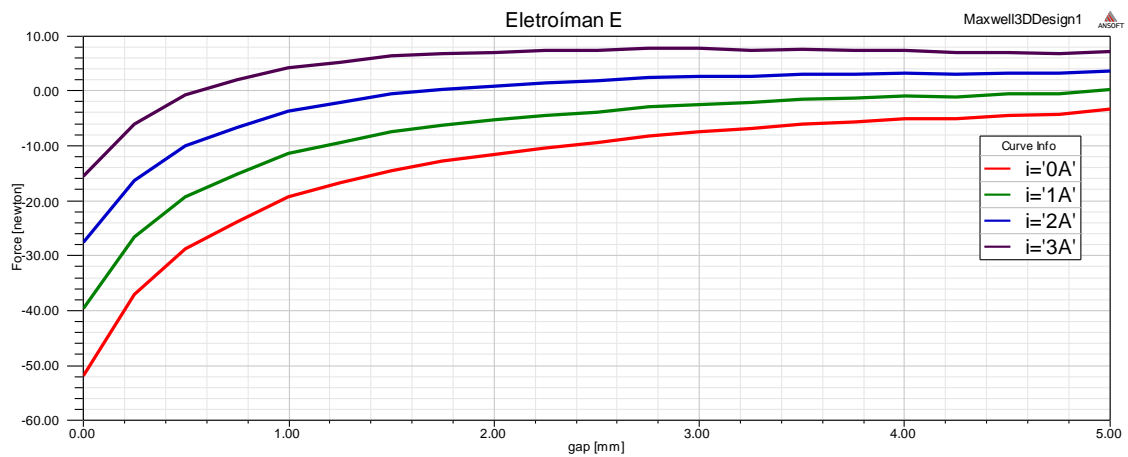


Figura 4.15 Força produzida pelo eletroímã de topologia E com os ímanes permanentes.

Pela análise os resultados presentes na Figura 4.15, é possível concluir que este eletroímã, consegue uma variação de força de repulsão de cerca de 30 N para um pico de corrente até 3 A, quando a estrutura esta em repouso.

Ainda pela análise do gráfico da Figura 4.15 é possível observar que contrariamente à topologia com eletroímã em I, o aumento do *gap* os ímanes permanentes fornecem uma zona de ganho, reduzindo assim os consumos numa levitação permanente.

Como é possível observar pelo gráfico da Figura 4.15, a força de repulsão produzida pelo eletroímã não é o suficiente para produzir uma força de repulsão que ultrapasse a força de atração do ímã permanente com o núcleo ferromagnético do eletroímã, ou seja, a força gerada pelo eletroímã unicamente consegue atenuar o efeito atrativo dos ímanes permanentes com o núcleo ferromagnético. Com isto em mente foi necessário utilizar a topologia de combinação de ímanes e eletroímãs, presente na Figura 4.16 para conseguir uma força de repulsão suficiente para elevar a estrutura.

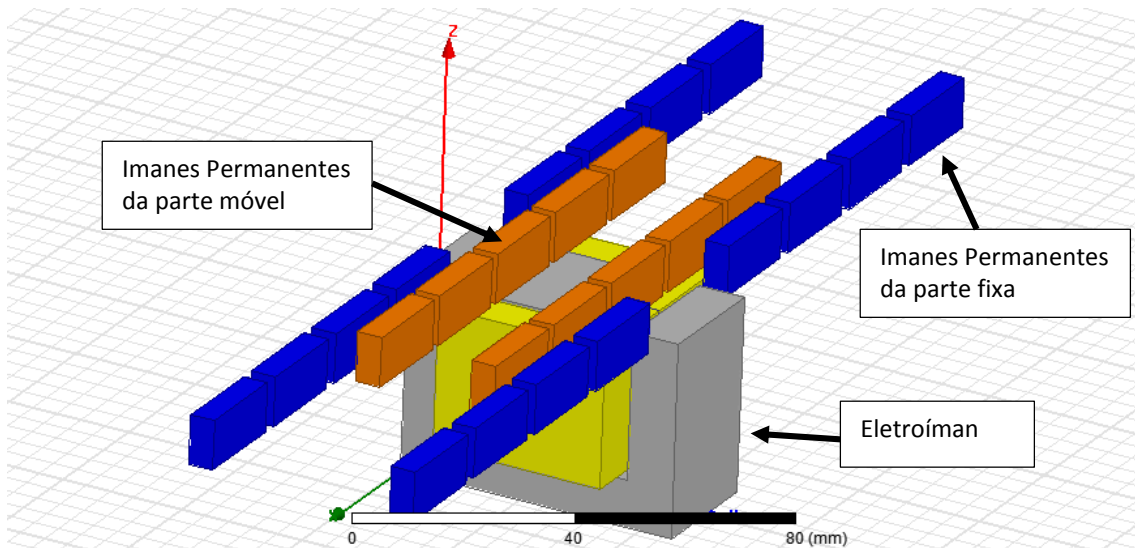


Figura 4.16 Simulação com ímanes permanentes totais

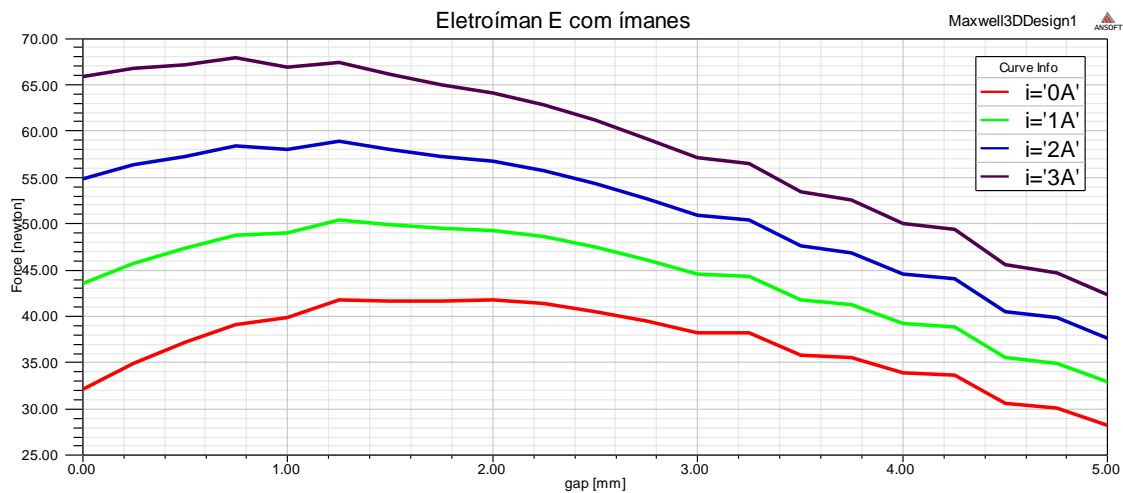


Figura 4.17 Força produzida pelo eletroímã e ímanes permanentes total.

Com base nos resultados da Figura 4.17, é possível observar que é possível elevar e controlar a altura de levitação para uma estrutura com um peso aproximado de 4.5 kg. Com este peso é possível manter a estrutura em levitação com um baixo consumo energético para um *gap* de aproximadamente de 5 mm.

4.2.3. Simulações protótipo final

A partir dos resultados obtidos na simulação do protótipo inicial foi adicionado à simulação o módulo com a totalidade dos ímanes da estrutura móvel. Nas figuras abaixo estão apresentados os ímanes usados, bem como a configuração relativamente ao eletroímã para a simulação.

Relativamente à estrutura do protótipo inicial, os ímanes da estrutura fixa foram aumentados para 19,05 x 12,7 x 6,35, de forma a exercer uma força superior e para que

a variação da força com a variação do *gap* seja mais reduzida, permitindo uma redução no consumo energético.

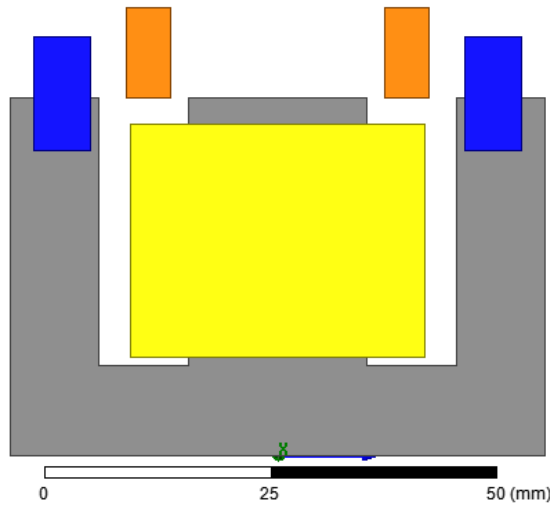


Figura 4.18 Vista de frente da simulação do módulo de levitação.

Com a introdução dos ímãs do veículo é possível obter em simulação a força que cada um dos módulos irá exercer na estrutura móvel.

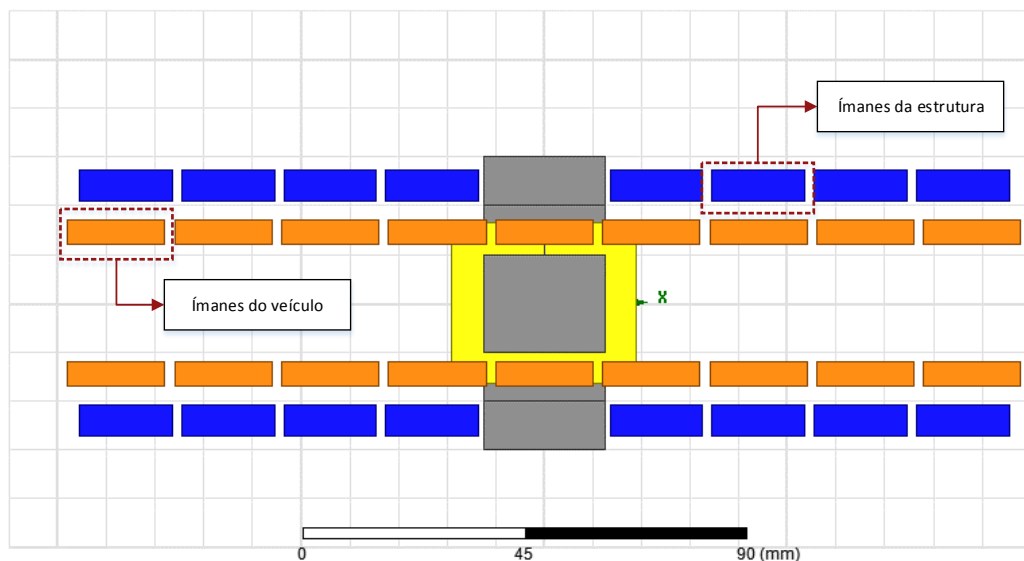


Figura 4.19 Vista de cima da simulação do módulo de levitação

Como foi mencionado anteriormente é necessário que o protótipo final consiga exercer uma força de repulsão superior a 34 kg de forma a levantar a janela, distribuída por três módulos e meio, ou seja aproximadamente cada módulo tem de exercer uma força de 10 kg. Com esta base foi elaborada a simulação da Figura 4.20, onde é possível observar que com os eletroímãs desligados a estrutura exerce contra a janela uma força de repulsão aproximadamente igual ao peso da janela, permitindo que com um pequeno impulso por parte dos eletroímãs (entre 1A a 2A) seja possível colocar a

janela em levitação. É possível também verificar que com a alteração a posição inicial da estrutura móvel, é possível controlar a força inicial necessária para elevar a estrutura.

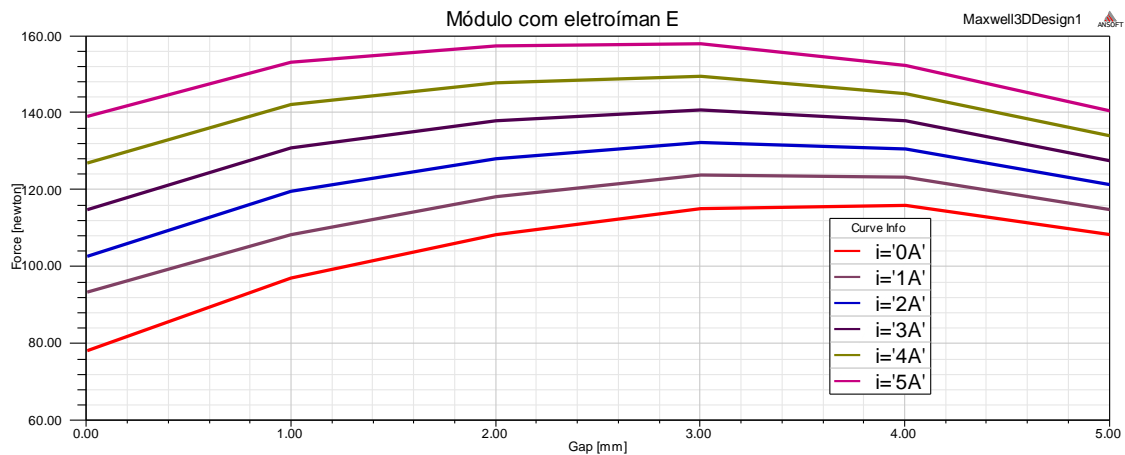


Figura 4.20 Gráfico da força de repulsão em função do gap entre o veículo e a estrutura fixa para diferentes níveis de corrente.

4.3. Metodologia

Nesta secção serão abordados os protótipos experimentais desenvolvidos no decorrer do projeto. Estes protótipos foram desenvolvidos de forma a verificar a viabilidade do conceito, ou seja, não respeitam as dimensões definidas do comprimento do módulo, à exceção do modelo apresentado na versão final. Com isto pretende-se conhecer e testar os vários métodos de construção e funcionamento, por forma a evoluir até uma versão que apresente o funcionamento desejado.

4.3.1. Topologia I

Após a verificação dos resultados do campo magnético simulados, foi desenvolvido o eletroímã de topologia I da Figura 4.21, com os mesmos parâmetros da simulação, para efetuar os testes experimentais, de forma a comprovar os resultados obtidos na simulação. Estes resultados serão apresentados no Capítulo 6.



Figura 4.21 Eletroímã em topologia I

4.3.2. Protótipo inicial

Com base nas simulações efetuados foi contruído o protótipo da Figura 4.22, respeitando o espaçamento entre os ímanes permanentes e eletroímã de forma a permitir a melhor aproximação com os resultados obtidos.

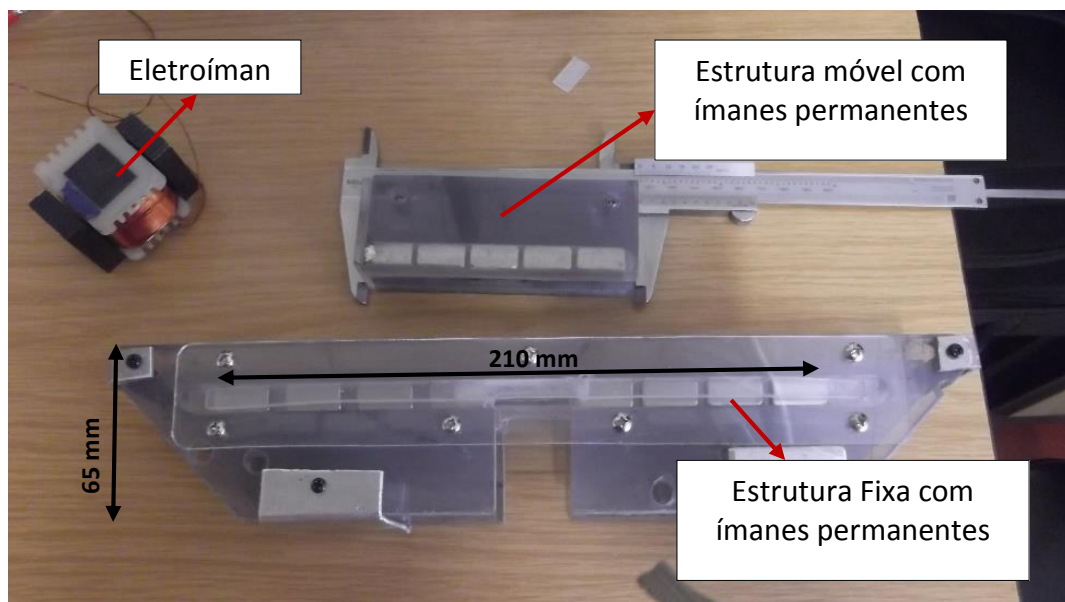


Figura 4.22 Protótipo em topologia vertical

Para a construção do enrolamento do eletroímã foi utilizada a bobinadora presente nos laboratórios do Departamento de Eletrônica Industrial, com os parâmetros da Tabela 4.3.

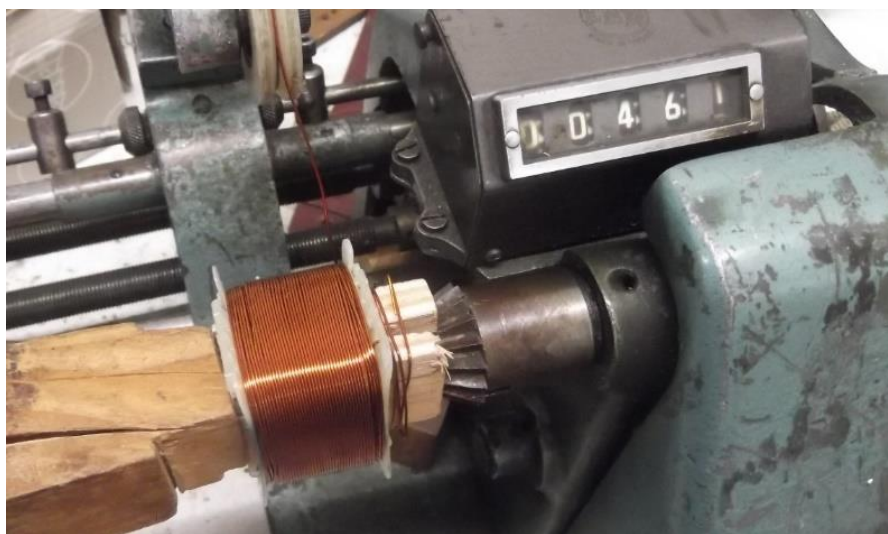


Figura 4.23 Bobinagem para o eletroímã de topologia E



Figura 4.24 Estrutura de testes do sistema de levitação.

Na Figura 4.24 está apresentada a estrutura de testes para o protótipo, desenvolvida de forma a testar o sistema de controlo e o sistema de levitação em ambiente semelhante aquele que iria ser encontrado no módulo de forma a finalizar o

conceito e partir para o protótipo final. Nesta estrutura está apresentada ligada à componente móvel do sistema um vidro de 110 mm por 660 mm com um peso de 4.5 kg, de forma a testar a capacidade de elevação do sistema eletromagnético.

4.3.3. Protótipo final

De forma a construir os eletroímãs para o controlo de levitação foi necessário obter núcleos ferromagnéticos para depois mandar bobinar com as especificações pretendidas. Atendendo as dimensões presentes nas simulações anteriores foi pedido chapa magnética em formato E com dimensões presentes na Tabela 4.4, comparativamente às dimensões do protótipo anterior está chapa magnética apresenta um tamanho ligeiramente superior, de modo que com aproximadamente o mesmo tamanho de núcleo se consiga um maior número de espiras, reduzindo a corrente necessária para a levitação.

Tabela 4.4 Parâmetros do eletroíman E60

Parâmetros	Valor
Núcleo ferromagnético	E 60. (chapa magnética)
Número de espiras	500
Diâmetro do fio de cobre [mm]	0.56
Resistência [Ω /km]	66.78[30]
Comprimento de fio [m]	65.66

Para a adaptação do sistema de levitação do protótipo anterior à janela final, foi necessário a construção de uma nova estrutura para ampliar o sistema às dimensões e peso da janela. Assim foi construído a estrutura modular da Figura 4.25. Esta estrutura contém todos os ímanes e eletroímãs necessários para o sistema de levitação, uma guia para o deslocamento da janela, bem como as placas eletrónicas para controlo que serão apresentadas na próxima secção.

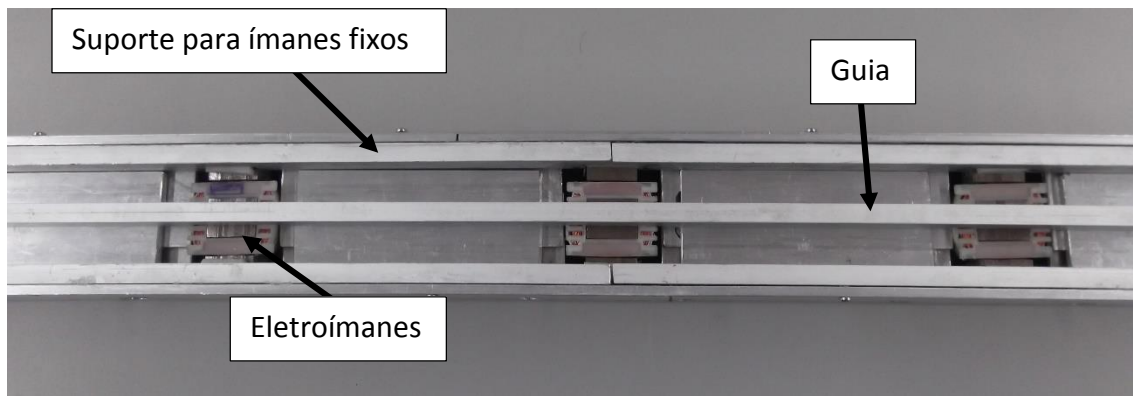


Figura 4.25 Estrutura do protótipo final

Na estrutura para se conseguir um ajuste do posicionamento dos eletroímãs em relação aos ímanes permanentes, presentes na estrutura fixa, foi concebido um sistema de ajuste através de vários parafusos, que permitem deslizar varias componente do sistema, como mostra a Figura 4.26. Através do sistema de ajuste desenvolvido é possível mover ajustar a dimensão x entre 40 mm e 80 mm e a dimensão z de 0 mm a 20 mm.

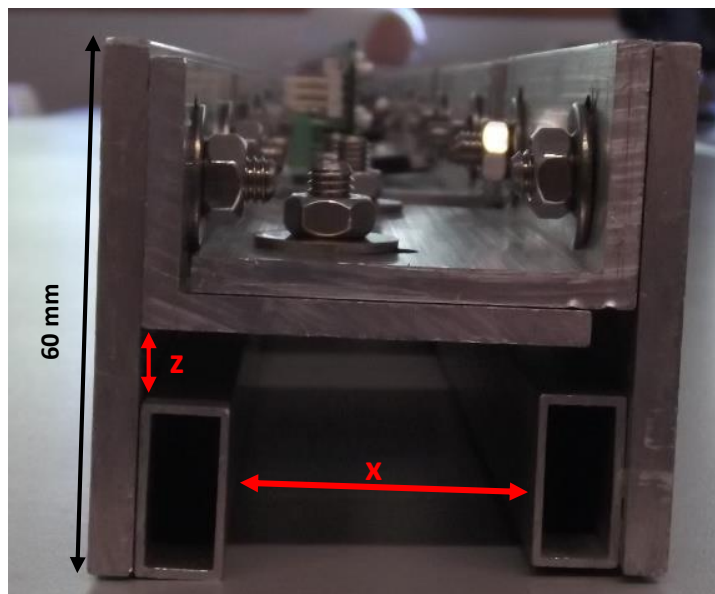


Figura 4.26 Sistema de ajuste

O veículo, neste caso a janela, teve também de ser adaptada uma barra de ímanes permanentes que permitira que a estrutura fixa exerça uma força de repulsão na janela. O sistema concebido pode ser observado na Figura 4.27.

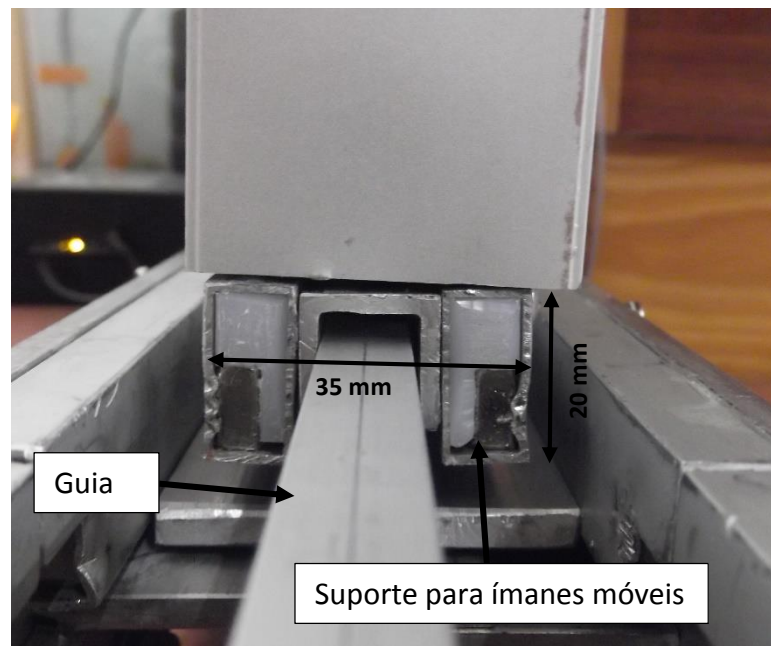


Figura 4.27 Estrutura de protótipo final da janela

O sistema de fixação da calha com os ímanes permanentes ao envidraçado é conseguido através de três parafusos ao longo da calha, reduzindo a intromissão na construção do perfil do envidraçado.

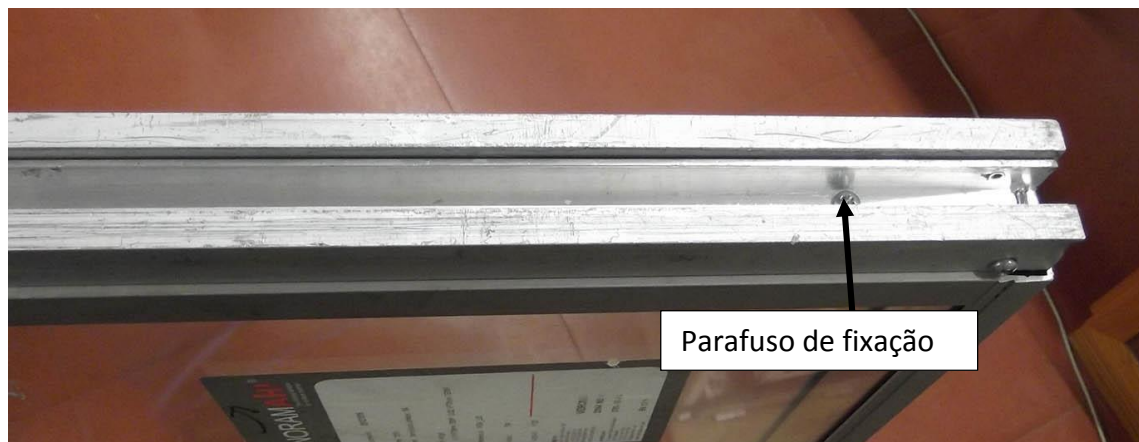


Figura 4.28 Janela, calha para ímanes.

Capítulo 5

Eletrónica de Controlo

Neste capítulo será apresentada toda a eletrónica de controlo necessária para o funcionamento do sistema de levitação. Esta secção será inicializada pela análise do sistema do sistema de controlo, seguindo a escolha dos componentes essenciais. Na parte final serão apresentados os algoritmos de controlo implementados.

5.1. Análise

Por forma a implementar o sistema de controlo serão analisadas as suas componentes detalhadamente. O principal componente centra-se no sistema de controlo de levitação responsável por estabilizar o veículo na pista. Na Figura 5.1 estão representadas os principais componentes do sistema que serão abordados com detalhe do decorrer deste capítulo.

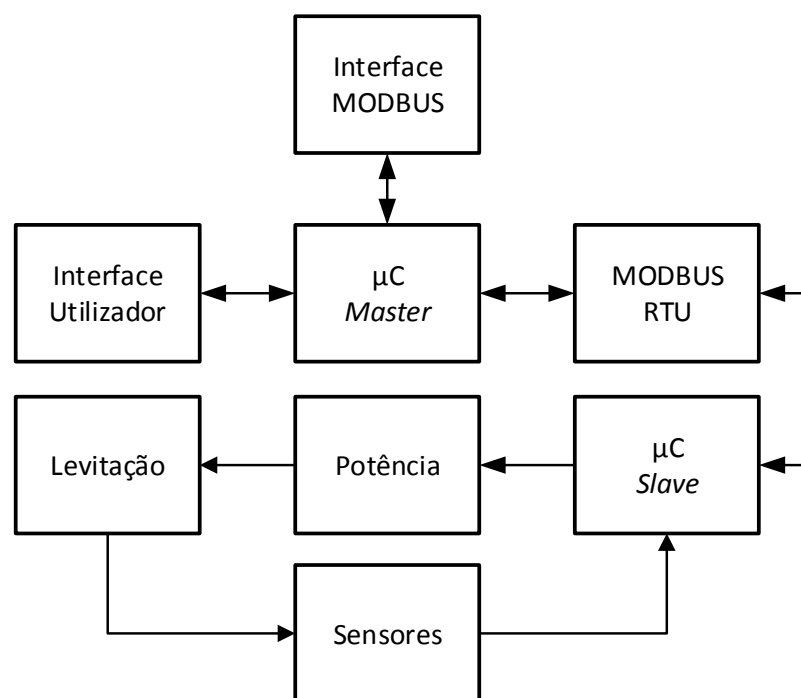


Figura 5.1 Diagrama de blocos do sistema de controlo

Com base no sistema de controlo começou o dimensionamento do sistema em si, ao qual foi necessário escolher os microcontroladores a serem usados.

5.1.1. Controladores

O primeiro passo será a recolha dos requisitos do sistema referentes à necessidade do microcontrolador, seguindo a análise dos requisitos mínimos que cada microcontrolador deverão cumprir.

Analisando os requisitos deste projeto verifica-se a necessidade de utilizar um protocolo de comunicação, de modo a gerir e monitorizar os parâmetros do sistema. Assim é necessário um microcontrolador com pelo menos um *universal asynchronous receiver/ transmitter* (UART) embebida. O microcontrolador *slave* deve possuir no mínimo uma saída *Pulse Width Modulation* (PWM), de forma a controlar os níveis de correntes aplicados ao circuito de potência. Deve estar dotado de entradas *Analog to digital converter* (ADC), de forma a permitir a conversão dos valores de tensão provenientes do sensor de Hall.

A fim de demonstrar a viabilidade deste conceito, o fator custo é muito importante. Sendo esta uma solução modular, os custos multiplicar-se-ão consoante o número de módulo, logo o custo do microcontrolador deverá ser o mais baixo possível sem comprometer os requisitos do sistema.

Uma vez identificados os requisitos de análise, será então realizado um estudo sobre alguns microcontroladores existentes no mercado.

Tabela 5.1 Comparação de microcontroladores para os módulos

Caraterísticas	ATMEGA328P[31]	MSP40G2553[32]	ATtiny841[33]
Entradas/ Saídas	23	16	12
Frequência CPU	16Mhz	16Mhz	16Mhz
Formato de dados	8bits	16bits	8bits
Memoria Flash	32 KB	16 KB	8 KB
Entradas analógicas	6 (10 bits)	8 (10 bits)	12 (10 bits)
Canais PWM	Sim	Sim	Sim
Interface	I2C, SPI, USART	I2C, SPI, UART	I2C, SPI, USART
Preço ⁽¹⁾	2.87€	1.86€	0.785€

(1) Preços obtidos através da *Farnell*[34]

Na Tabela 5.1 foram comparadas algumas das características dos dispositivos selecionados. Assim pelas características base dos microcontroladores apresentados é possível verificar que a principal diferença entre eles, para além da diferença de preço é o facto do microcontrolador MSP430G2553, apresentar um formato de dados de 16 bits, o que aumenta a velocidade de processamento em cálculos, enquanto os outros apresentam um formato de dados de 8 bits.

Relativamente à comparação das características entre os dos microcontroladores de 8 bits a escolha, tendo que os dois possuem os requisitos mínimos para o funcionamento do sistema, passa pela capacidade de memória de programa, visto que será implementado o protocolo MODBUS, é necessária alguma memória para reter o protocolo. Visto isto é possível descartar o microcontrolador ATtiny841.

Comparando os restantes dispositivos é possível verificar que o microcontrolador MSP430G2553 apresenta um formato de dados de 16 *bits* e um preço significativamente mais baixo, sendo a escolha para este projeto.

Para programar este microcontrolador será utilizado a placa de desenvolvimento da *Texas Instruments* apresentada na Figura 5.2. esta placa de desenvolvimento permite programar o microcontrolador fora da placa de desenvolvimento, através de uma ligação de cinco pinos. Este dispositivo permite ainda programar e fazer *debug* do microcontrolador de diferentes pacotes, sejam eles *Semi Metallic Disc* (SMD) ou *Dual In-Line Package* (DIP).



Figura 5.2 LAUNCHPAD MSP-EXP430G2

Por forma a implementar o sistema de controlo para controlar todos os módulos é necessário um microcontrolador capaz de gerir todos dos módulos do sistema, gerir a comunicação entre eles e o utilizador do sistema.

Um interface terá que ser utilizado para o utilizador do sistema consiga comandar o sistema de levitação, bem como observar o que o sistema de controlo está a executar para possíveis resoluções de erros, ou alteração de parâmetros do sistema. Com este intuito foi pensado a utilização de um interface gráfico, recorrendo à tecnologia LCD e ecrã tátil, para a elaboração deste interface.

Para o projeto do sistema de levitação aplicado em janelas deslizantes, o tipo de ecrã é um parâmetro a considerar visto que o utilizador pode estar a utilizar luvas para ativar o ecrã, logo um ecrã tátil capacitivo não funcionaria sem a utilização de outro equipamento ou substancia extra, como pasta condutiva, o que não é prático. Por este motivo será utilizado um ecrã tátil resistivo, este funciona a partir da deformação do ecrã tátil, logo é ativado com qualquer material desde que haja uma pequena pressão exercida.

Apos a pesquisa de módulos LCD com ecrã tátil incorporado foi identificado o módulo LCD SSD1963 da Figura 5.3. este dispositivo apresenta uma diagonal e 4.3 polegadas, com um ecrã tátil resistivo.



Figura 5.3 Módulo LCD SSD1963

Este módulo LCD contém internamente uma memória FLASH pré-programada, com diferentes ícones para facilitar a programação ambiente gráfico, bem como os produtores do dispositivo fornecem bibliotecas para aceder aos periféricos e desenho das aplicações no LCD.

Para além das caraterísticas descritas, existe para este modulo uma *shield*, para ligação ao microcontrolador Arduino mega, ou Arduino Due, o que facilita a montagem deste dispositivo no protótipo, sem a necessidade da utilização de fios e componentes extras.

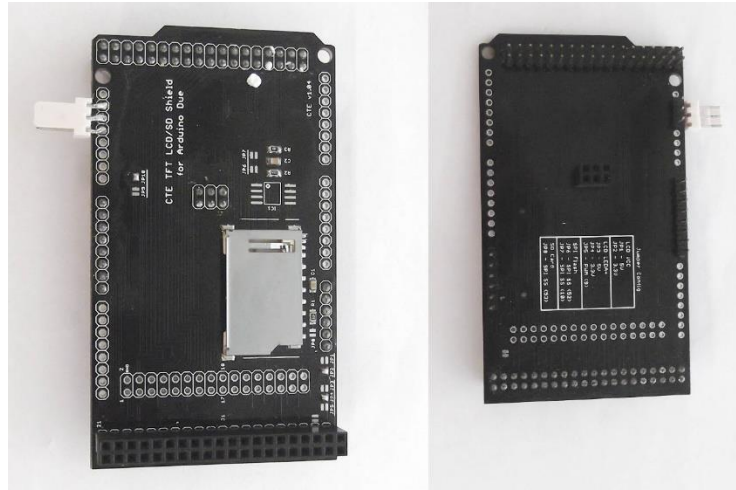


Figura 5.4 *Shield* para Arduino Due

De forma a utilizar o módulo LCD é necessário um microcontrolador capaz de responder às necessidades de controlo do sistema de levitação, bem como às necessidades do interface gráfico, processamento e memória *flash*.

Visto que o módulo LCD é possível a ligação fácil às placas de desenvolvimento Arduino Mega e Arduino DUE, a escolha do microcontrolador recairá sobre estes. Na Tabela 5.2 estão as principais características dos microcontroladores.

Tabela 5.2 Comparação de microcontroladores para controlador

Características	Arduino Due[35]	Arduino Mega[36]
Microcontrolador	SAM3X8E ARM Cortex-M3	ATmega2560
Formato de dados	32 bits	8 bits
Frequência CPU	84 MHz	16Mhz
Interface	USART, SPI, I2C	USART, SPI, I2C
Entradas/ saídas	54	54
Memoria Flash	512KB	256KB

O micro controlador a utilizar deve ser capaz de conseguir armazenar em memória todas as bibliotecas do módulo LCD, bem como as bibliotecas para o protocolo de comunicação, logo a escolha de um microcontrolador com uma alta memória de programa é necessária, comparando os dois dispositivos é possível verificar

que ambos possuem estes requisitos. Ambos os microcontroladores devem ter incorporado uma USART para o protocolo de comunicação MODBUS requerida para a comunicação dos módulos. A escolha será efetuada sobre a velocidade de processamento dos dois módulos. O Arduino DUE apresenta um formato de dados de 32 *bits* e uma frequência de CPU de 84 MHz, estes dois parâmetros juntos apresentam velocidades de processamento superiores, visto que um formato de dados de 32 *bits* são necessários menos cálculos para obter os mesmos resultados e cada cálculo demora menos tempo devido à velocidade de processamento maior. Assim foi utilizado para este projeto o microcontrolador Arduino DUE.

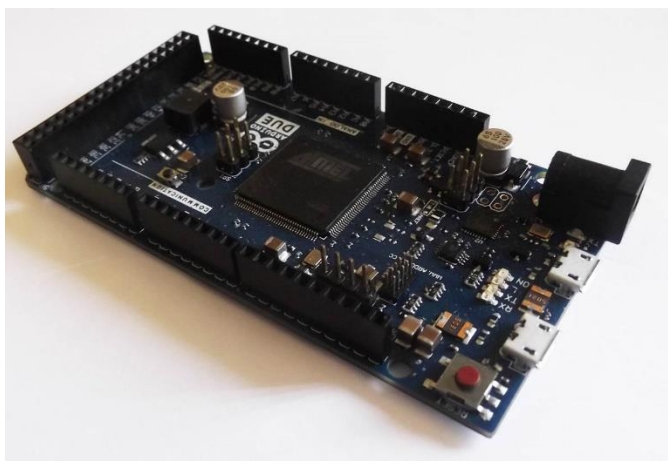


Figura 5.5 Placa de desenvolvimento Arduino Due

5.1.2. Sensor de leitura para o *gap*

Esta fase foi inicializada através do estudo sobre que sensores estariam mais aptos a usar na aplicação de janelas deslizantes. Esta aplicação envolve varias limitações relativamente ao local onde será inserida, logo nem todos o sensores existentes no mercado que potencialmente serviriam para a leitura de altura da janela poderiam ser utilizados. Sensores tais como, ultrassons, adquirem diferentes valores dependentes da superfície que estão a medir e o angulo de reflexão das ondas, e possuem um custo elevado, sensores óticos, devido à aplicação estar em diferentes condições de luz os valores adquiridos não seriam precisos, bem como a interferência de sombras e sujidade afetariam as condições de leitura, a solução surgiu com o uso de sensores de efeito Hall.

Os sensores de efeito Hall apresenta um custo reduzido e de fácil implementação, detetam o fluxo do campo magnético dos ímanes permanentes que constituem a janela, tornando possível através da variação do fluxo magnético lido

identificar a proporcionalidade com a altura da janela. O sensor de efeito Hall utilizado foi o A1302 da *Allegro Microsystems* [37], presente na Figura 5.6.

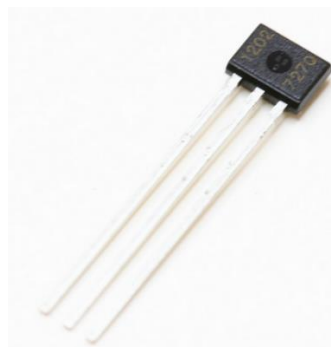


Figura 5.6 Sensor de efeito Hall A1302

Este modelo no estado de repouso (sem um significativo campo magnético) apresenta um valor da tensão da saída igual a metade da alimentação. Na presença de uma polaridade sul (+B) perpendicular à face do pacote do componente aumenta a tensão de saída, da tensão do estado de repouso até à tensão de alimentação, em proporção com o campo magnético aplicado. A aplicação de um campo de polaridade norte (-B) a tensão de saída decremente proporcionalmente da tensão de repouso.

O modelo A1302 apresenta ainda uma relação métrica com a saída, isto é, a tensão de repouso e a sensibilidade do campo magnético é proporcional com a tensão de alimentação. Pela Tabela 5.3 é possível observar os parâmetros de funcionamento do sensor de efeito Hall.

Tabela 5.3 Parâmetros de funcionamento do sensor de efeito Hall A1302

Características	Valor
Tensão V_{CC} [V]	5
Tensão de repouso [V]	2.5
Sensibilidade magnética [mV/G]	1.3

5.1.3. Dispositivo Atuador

Com a funcionalidade de efetuar o interface entre o sistema de controle, através do microcontrolador MSP430G2553, e o eletroímã é necessário um dispositivo que em associação com o microcontrolador seja capaz de efetuar a variação de corrente aos terminais do eletroímã. Para este fim existe uma variedade de dispositivos como *mosfets*, transístores bipolares, *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) entre outros.

Para o projeto foi escolhido o semiconductor totalmente controlado *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET). O MOSFET em comparação com transístores bipolares, necessita para efetuar a comutação de uma tensão entre a *gate* e a *source*. No caso dos transístores bipolares o este controlo é efetuado com uma corrente de base.

O MOSFET a ser implementado no sistema tem de ter características de ligação que para reduzir os custos de implementação não seja necessário de um circuito auxiliar para efetuar o *drive* dele. Para isso é necessário para além de outros parâmetros importantes do MOSFET que tenha uma baixa tensão de *threshold* de modo a ser possível a ligação diretamente ao microcontrolador com uma tensão de saída máxima de 3.3 V.

Para a escolha do semiconductor é necessário selecionar os parâmetros nominais a que vai funcionar. De acordo com os resultados práticos e de simulação dos eletroímãs é necessário uma corrente máxima para cada eletroímã de 3 A e uma tensão de aproximadamente 13 V, ou seja é necessário um componente com características nominais superiores de modo a que não sejam ultrapassadas e de modo ao semiconductor trabalhar longe dos parâmetros nominais de forma a aumentar o seu tempo de vida, trabalhando a temperaturas inferiores. Os parâmetros principais do *mosfet* podem ser observados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Parâmetros do *mosfet* STP16NF06

Características	Valor
Tensão V_{DSS} [V]	60
Corrente I_D [A]	16
$R_{DS(on)}$ [Ω]	0.08
$V_{GS(th)}$ [V]	2 – 4

Atendendo que as características nominais do semiconductor estão muito acima das características do eletroímã é mesmo assim necessário efetuar o sistema de dissipação da temperatura que será produzida a comutação e condução do *mosfet*. Para isso, como a estrutura do protótipo final é de alumínio, um bom dissipador térmico será utilizada a estrutura como dissipador. Devido ao facto que a maior parte dos *mosfets* existentes no mercado não são isolados, isto é, não existe isolamento entre o terminal dreno e o dissipador do *package*, é necessário efetua-lo externamente. A partir do *kit* de

isolamento da Figura 5.7, é possível encostar todos os dispositivos à estrutura de alumínio sem que haja contacto elétrico entre os diversos *mosfets* presentes nos módulos, permitindo ainda aterrar a estrutura.

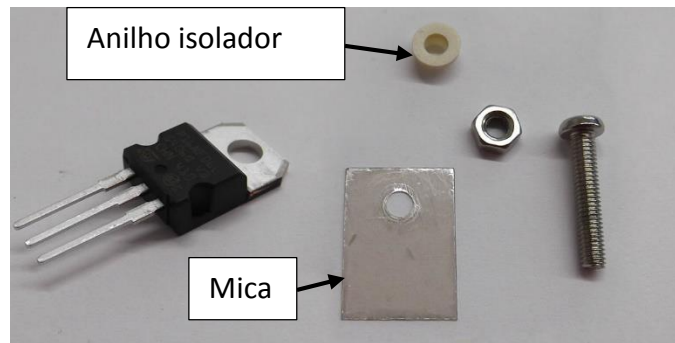


Figura 5.7 Mosfet STP16NF06 e Kit de isolamento

5.1.4. Fonte de alimentação

Depois da análise da eletrônica de controlo e da análise eletromagnética é possível determinar os consumos que o circuito de controlo de potência iram gastar.

Como foi visto na secção anterior os consumos dos eletroímãs estão dimensionados para um consumo de aproximadamente em regime permanente para um consumo de 1 A, necessitando de um pulso inicial para conseguir vencer a inercia de aproximadamente o dobro dessa corrente.

Para a implementação no módulo final é necessário que pelo menos três módulos estejam ativos ao mesmo tempo. Com este propósito foi adquirida a fonte de alimentação da Figura 5.8, com as características da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Características da fonte de alimentação

Características	Valor
Tensão de saída [VDC]	24
Corrente de Saída [A]	15
Potência [W]	360
Tensão de entrada [VAC]	100-120
	200-240



Figura 5.8 Fonte de alimentação AD2415

5.2. Metodologia

Nesta secção serão apresentadas as etapas de implementação das várias funcionalidades presentes no sistema de controlo, sendo as principais: o controlo de posição e levitação, comunicação usando o protocolo MODBUS e interface com o utilizador.

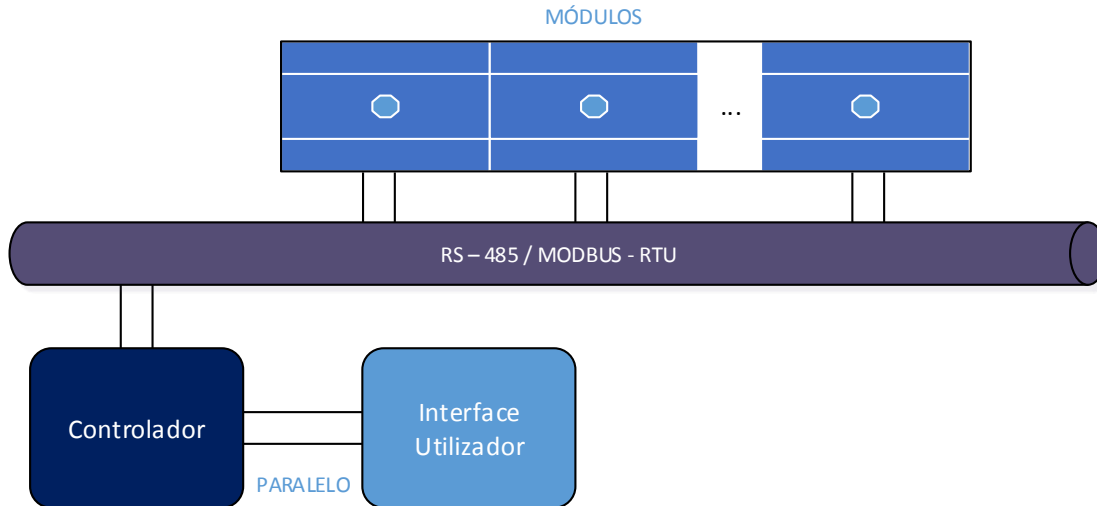


Figura 5.9 Visão geral do sistema

No decorrer desta secção serão apresentados os principais pontos de desenvolvimento sendo que não será atribuída grande importância às funções básicas de funcionamento dos microcontroladores, dando maior importância às funcionalidades que afetam diretamente o funcionamento do sistema de controlo.

5.2.1. Protocolo de Comunicação

O protocolo desempenha, um papel de maior relevo no sistema, uma vez que tem a seu cargo a função de comunicação entre módulos, ou seja, é responsável por transmitir mensagens entre os vários módulos e o utilizador. Estas mensagens têm no seu campo de dados informações relacionadas com o bom funcionamento do sistema, bem como, a sua segurança.

Nesta secção serão apresentados o *hardware* implementado e alguns aspetos relacionados com a codificação.

Para ser possível estabelecer uma comunicação, utilizando o protocolo MODBUS em termos de *hardware* é necessário um *transceiver*, onde este é responsável por tornar compatíveis os sinais digitais provenientes do microcontrolador com os níveis elétricos requeridos pela rede RS-485, para o correto funcionamento da comunicação. Para a escolha do *transceiver* a escolha recaiu sobre o modelo SN65176B [38] da *Texas Instruments*.

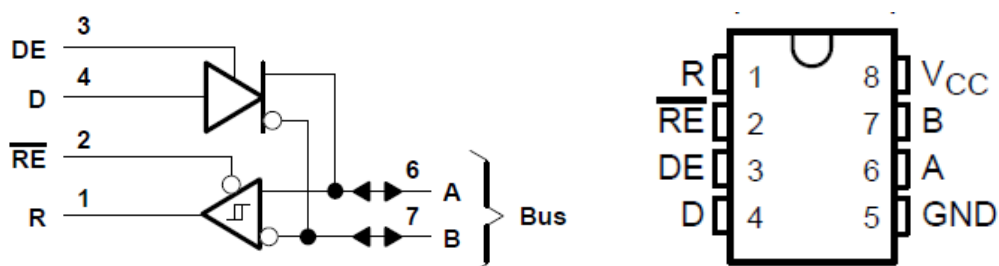


Figura 5.10 Esquema Logico do *transceiver* SN65176B [38].

Na Figura 5.10 está apresentado o esquema logico do circuito integrado *transceiver*. Como é possível verificar este componente contém nele um recetor e um transmissor com ativação a baixo e alto nível respetivamente, que podem ser conectados externamente para funcionar como controlo de fluxo. A saída diferencial do transmissor e a entrada diferencial do recetor estão ligadas internamente para formar uma saída/entrada diferencial.

Na Figura 5.11 está apresentado o algoritmo implementado para a receção da comunicação MODBUS, podem-se observar as principais etapas de implementação. Após a inicialização do microcontrolador, são configurados vários parâmetros, registos do sistema, interrupções e bibliotecas relacionadas com a comunicação. Após a inicialização e configuração o microcontrolador entra a rotina principal.

Na rotina principal, quando é recebida uma mensagem através da interrupção de receção da porta serie (UART), esta é copiada do *buffer* de entrada para outro *buffer* para futuro processamento dos dados. Após este passo, o algoritmo analisa o CRC, calculando de novo o CRC e comparando-o com o CRC recebido na mensagem. Caso se verifique que os dois CRCs são iguais, a mensagem é validada e o algoritmo segue o seu percurso. Caso a situação anterior se verifique o programa segue a verificação do endereço para o qual a mensagem está endereçada. O endereço recebido é comparado com o endereço do módulo e com o endereço global, caso estes coincidam será executada a filtragem da mensagem. Se a mensagem filtrada coincidir com as mensagens do dicionário de dados existente no programa será executada a tarefa pedida e, caso seja o endereço do módulo é enviada a confirmação ao *master* da execução da tarefa, caso seja o endereço global não é enviada qualquer confirmação. Se a mensagem não existir no dicionário de dados é enviada uma mensagem de erro para o *master*.

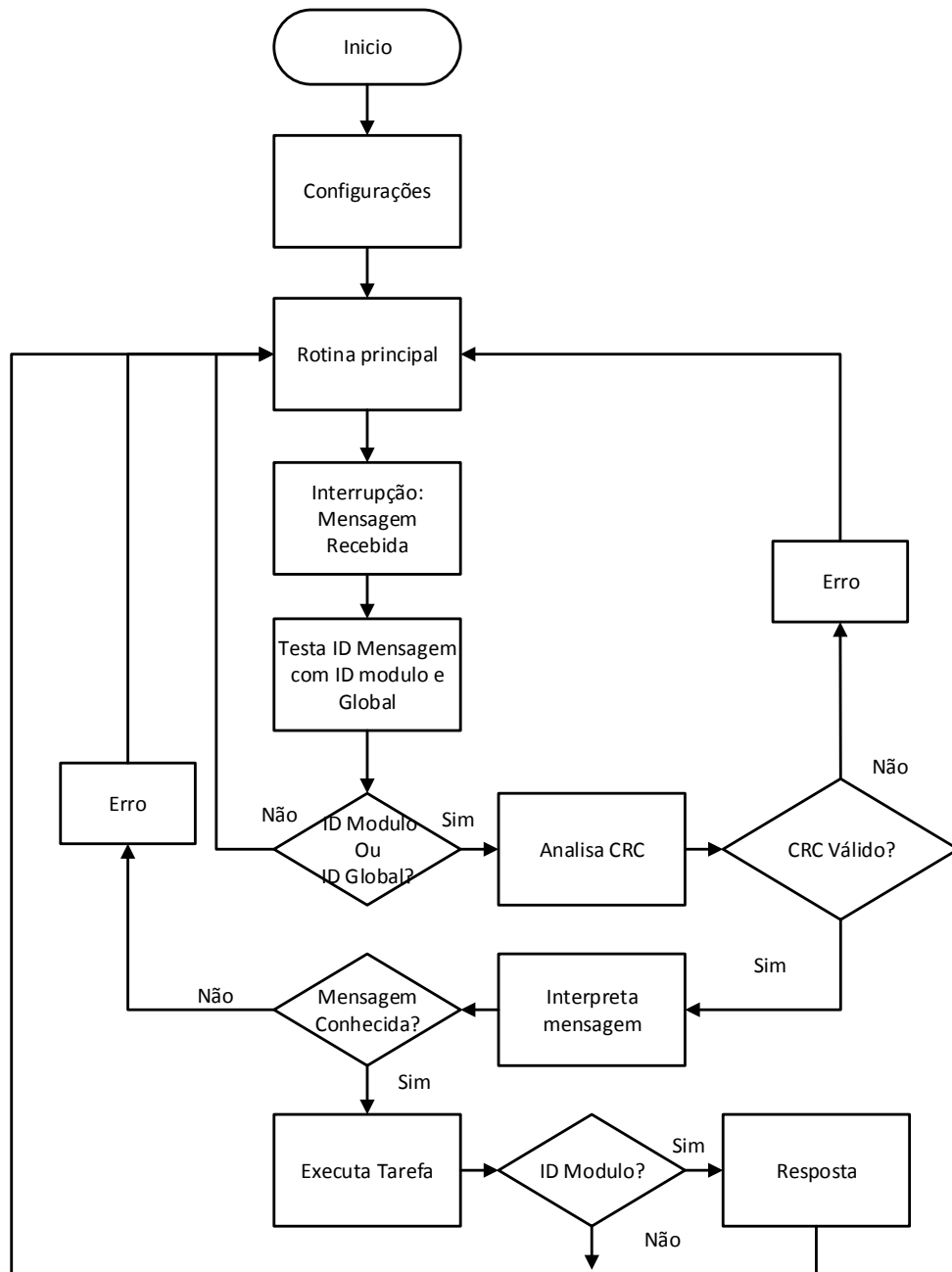


Figura 5.11 Algoritmo de receção da comunicação MODBUS

Por sua vez quando é necessário envio de uma mensagem o algoritmo de envio é executado, ilustrado na Figura 5.12, a mensagem é enviada para o *buffer* de saída da porta serie, através da sua interrupção para o endereço desejado. Após enviados todos os *bytes* da mensagem caso o endereço seja único, ou seja só para um módulo, é inicializado um *timeout*, que espera pela receção da resposta proveniente do módulo *slave*. Caso a mensagem de resposta não seja recebida antes do *timeout* acabar a mensagem é reenviada.

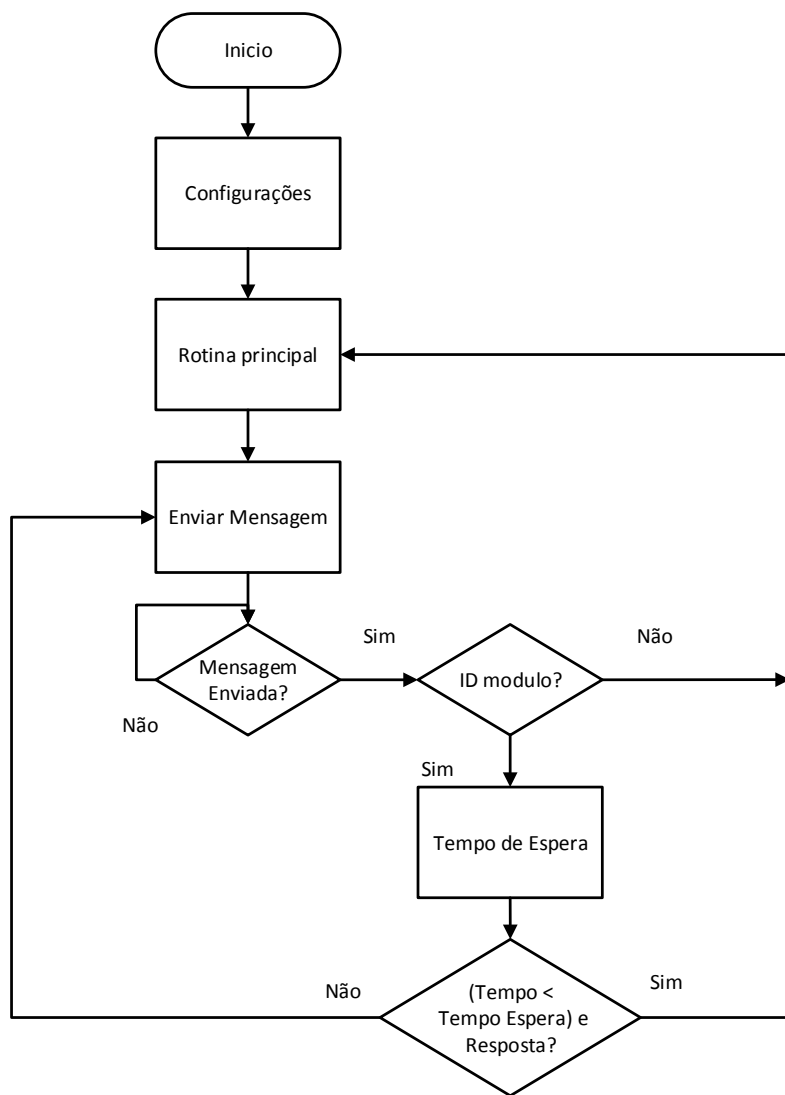


Figura 5.12 Rotina de envio da comunicação MODBUS

5.2.2. Dicionário de dados

O dicionário de dados é um conjunto de mensagens que podem ser transmitida numa rede. O dicionário implementado no *software* deve ser o mesmo em todos módulos conectados à rede MODBUS, garantindo total compatibilidade entre os módulos conectados ao barramento. Na secção seguinte será apresentado o dicionário de dados desenvolvido para realizar as tarefas entre os módulos e o controlador.

Leitura de registos (0x03)

Este comando tem como funcionalidade a leitura do conteúdo dos registos contidos no dispositivo *slave*. Este comando devido a existir uma resposta por parte do dispositivo *slave* não suporta *broadcast*, ou seja, só é possível o envio do comando para um único módulo.

A pergunta é inicializada com a identificação do módulo desejado e com o comando, de seguida é colocado na mensagem o endereço inicial do registo de onde se encontra a informação e a quantidade de registos a ler. Por sua vez a resposta retorna a identificação do módulo com o código funcional idêntico ao da pergunta efetuada, seguindo a quantidade de *bytes* que a mensagem transporta e o valor de cada registo. Caso exista um erro na mensagem recebida é enviado ao *master* uma resposta com o código de erro.

Tabela 5.6 Ler Registos

Pergunta		
Endereço do Módulo	1 Byte	0x01 a 0xFF
Código Funcional	1 Byte	0x03
Endereço Inicial	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Quantidade de Registos	2 Bytes	1 a 10
Resposta		
Endereço do Módulo	1 Byte	0x01 a 0xFF
Código Funcional	1 Byte	0x03
Número de Bytes	1 Byte	2 x N
Valor do registo	N x 2 Bytes	Valor
Erro		
Código de Erro	1 Byte	0x83
Código de Exceção	1 Byte	01, 02, 03, 04

Neste projeto este comando terá como principal função pedir a leitura dos sensores de posição, para o feedback do programa de controlo na deteção de erros.

Escrever registo único (0x06)

Este comando tem como funcionalidade a escrita de um único registo existente no dispositivo *slave*. Este comando devido a existir uma resposta por parte do dispositivo *slave* não suporta *broadcast*.

A pergunta é inicializada com a identificação do módulo desejado e com o comando, de seguida é colocado na mensagem o endereço do registo a escrever e o valor do registo. Por sua vez a resposta retorna a mesma mensagem que foi enviada. Caso exista um erro na mensagem recebida é enviado ao *master* uma resposta com o código de erro.

Tabela 5.7 Escrever registo único

Pergunta		
Endereço do Módulo	1 Byte	0x01 a 0xFF
Código Funcional	1 Byte	0x06
Endereço Inicial	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Valor do registo	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Resposta		
Endereço do Módulo	1 Byte	0x01 a 0xFF
Código Funcional	1 Byte	0x06
Endereço Inicial	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Valor do registo	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Erro		
Código de Erro	1 Byte	0x86
Código de Exceção	1 Byte	01, 02, 03, 04

Com este código funcional será possível escrever individualmente os valores dos parâmetros do sistema de controlo, tais como parâmetros do controlador PID, calibração individual dos sensores, etc.

Escrever em registos múltiplos (0x10)

Este comando tem como funcionalidade a escrita de conteúdo dos registos existentes nos dispositivos *slave*. Este comando devido a existir uma resposta por parte do dispositivo *slave* não suporta *broadcast*.

A pergunta é inicializada com a identificação do módulo desejado e com o comando, de seguida é colocado na mensagem o endereço inicial dos registos a escrever, seguindo a quantidade de registo da mensagem, o número de *bytes* da mensagem e finalmente os valores dos registos. Por sua vez a resposta retorna o endereço do módulo e o comando da pergunta seguida do endereço inicial dos registos a escrever e a quantidade de registos escritos. Caso exista um erro na mensagem recebida é enviado ao *master* uma resposta com o código de erro.

Tabela 5.8 Escrever registos múltiplos

Pergunta

Endereço do Módulo	1 Byte	0x01 a 0xFF
Código Funcional	1 Byte	0x10
Endereço Inicial	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Quantidade de Registos	2 Bytes	1 a 10
Número de Bytes	1 Byte	2 x N
Valor do registo	N x 2 Bytes	Valor
Resposta		
Endereço do Módulo	1 Byte	0x01 a 0xFF
Código Funcional	1 Byte	0x10
Endereço Inicial	2 Bytes	0x0000 a 0xFFFF
Quantidade de Registos	2 Bytes	1 a 10
Erro		
Código de Erro	1 Byte	0x90
Código de Exceção	1 Byte	01, 02, 03, 04

Tal como o código anterior, este é utilizado para enviar para os módulos os parâmetros de controlo desejados. A principal diferença é que com este comando é possível enviar vários parâmetros de uma só vez para os módulos, desde que estejam localizados de forma sequencial em memória.

5.2.3. Controlo de levitação

Nesta secção do documento será discutida uma das principais funcionalidades do microcontrolador: o controlo de altura da janela através dos eletroímãs.

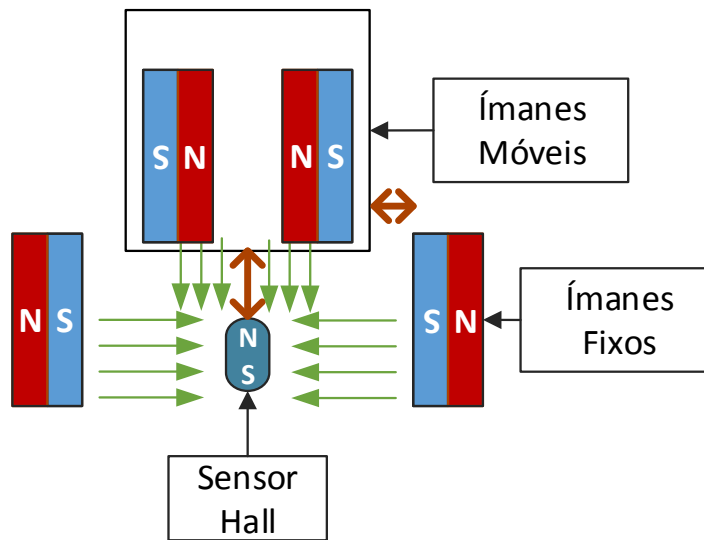


Figura 5.13 Configuração do posicionamento do sensor Hall

Para o programa de controlo identificar o posicionamento, foi utilizado um sensor de efeito de Hall posicionado como mostra a Figura 5.13 de modo a efetuar a leitura do campo magnético da estrutura móvel. Devido à posição dos ímanes fixos relativamente ao sensor de efeito de Hall ser simétrica, os campos magnéticos no local do sensor são constantes e iguais a zero, devido ao campo magnético se anular como mostra a simulação da Figura 5.14. Assim com a variação do *gap* entre a estrutura móvel e sensor de efeito Hall, é possível ter uma variação do campo magnético proporcional ao deslocamento.

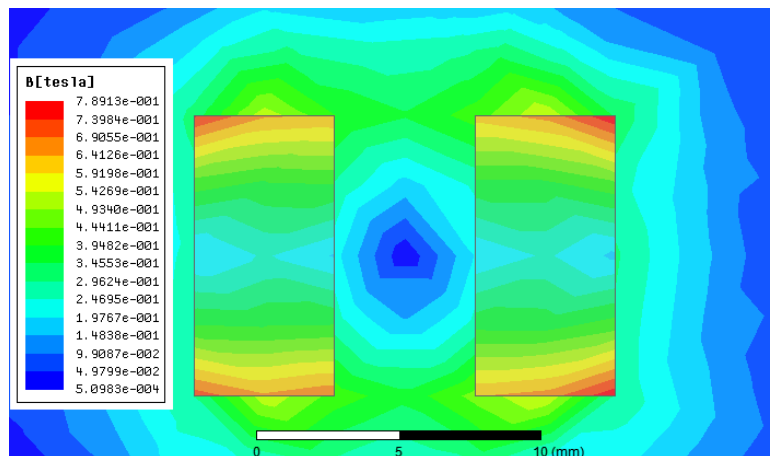


Figura 5.14 Campo Magnético entre dois ímanes iguais

O posicionamento do sensor de efeito de Hall tem outra razão: devido às características do sensor de Hall é possível efetuar a leitura dos campos do polo norte ou sul. Assim é necessário de manter o *gap* lateral uniforme de modo a que o sensor leia só um dos polos, neste caso o polo norte. Caso seja efetuada a leitura do polo contrário a

tensão na saída do sensor de Hall será contrária à lida do polo norte, o que teria um impacto negativo no sistema de controlo.

Cada módulo é composto por uma placa de *drive*, presente na Figura 5.15, responsável, independentemente do controlador principal, pelo controlo de altura da janela. O esquemático desenvolvido com o *software EAGLE* pode ser visualizado no Anexo 1.

A placa *drive* é controlada a partir do microcontrolador MSP430G2553, com *software* responsável pelo controlo de altura e posicionamento. A partir desta placa é possível controlar cada modulo individualmente através do protocolo de comunicação MODBUS.

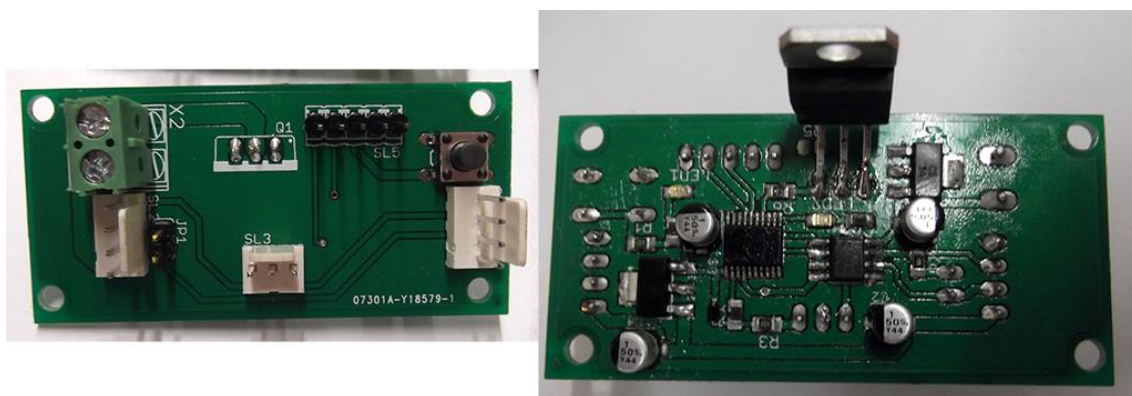


Figura 5.15 Placa *drive*

O microcontrolador presente na placa *drive* espera que o controlador principal indique uma ordem de início (verificação que o utilizador mandou abrir ou fechar a janela), apos esta ordem cada modulo é capaz de auto ajustar a altura da janela para a referencia previamente programada.

O fluxograma da Figura 5.16 representa o algoritmo de controlo de altura através do sensor de efeito Hall. O algoritmo é inicializado quando ocorre a receção de uma mensagem de *broadcast* para todos os módulos de aviso de ligação. Após esta ordem o microcontrolador lê o valor do sensor Hall através do ADC com uma determinada frequência de amostragem. Caso detete que a janela esteja por cima do eletroímã, o microcontrolador ativa a rotina do controlador PID, responsável por manter uma levitação constante na janela. Após o sensor de cada módulo não detetar a janela depois de um determinado limite de tempo, o microcontrolador automaticamente desliga o controlador PID e fica em espera que a janela se aproxime dele. Caso ao fim de algum tempo não existir movimento da janela, a unidade de controlo principal indica aos módulos que podem ser desligados, colocando-os em poupança de energia.

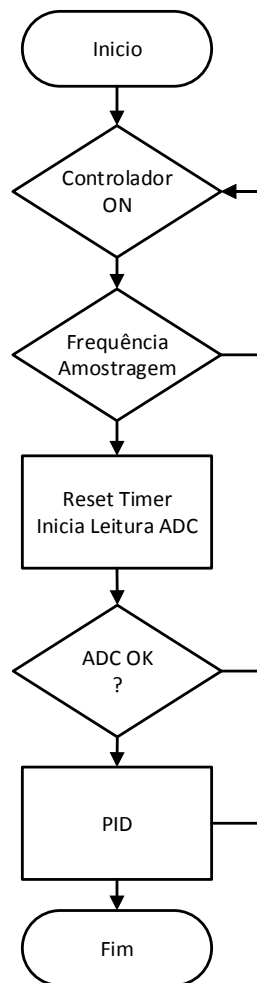


Figura 5.16 Fluxograma do controlo do eletroímã

5.2.4. Controlo de posição

De forma ao programa identificar a localização da janela foi desenvolvido com o *hardware* utilizado anteriormente para o controlo de levitação, o *software* para localizar a posição da janela. Na Figura 5.17 é mostrada a representação geral do sistema de posicionamento baseado na localização dos módulos. Isto é possível através dos sensores de efeito Hall localizados em cada módulo.

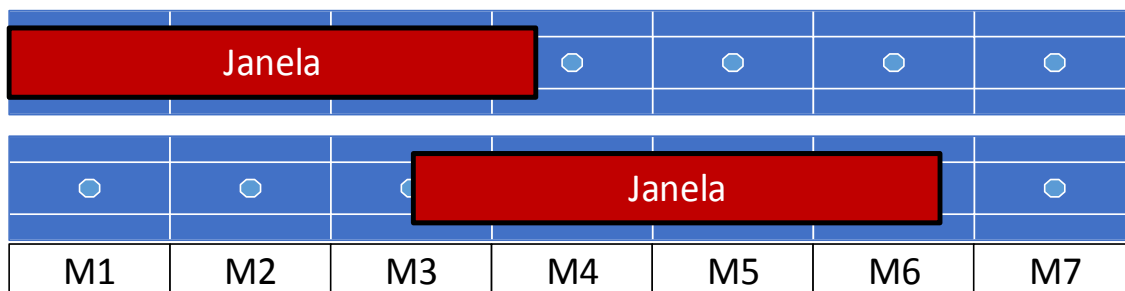


Figura 5.17 Representação do sistema de posicionamento

Após ser verificada a viabilidade do sistema foi implementado no controlador *master* o algoritmo de controlo presente na Figura 5.18.

O algoritmo de controlo inicia um contador com o valor do primeiro módulo; após esta inicialização o programa entra na rotina que envia um pedido de leitura do sensor Hall de cada módulo. Caso o valor lido represente que a janela está em cima do módulo é ativada a *flag* de deteção. Posteriormente o algoritmo corre até não ser detetada a janela e quando isto acontece, ou seja, quando na leitura anterior tinha sido detetada a janela e na leitura atual não for detetada, o algoritmo de localização é parado, assumindo que não existe mais janela para a frente. Caso não seja detetada, o algoritmo passa para o próximo modulo testando novamente o valor do sensor Hall até encontrar a janela.

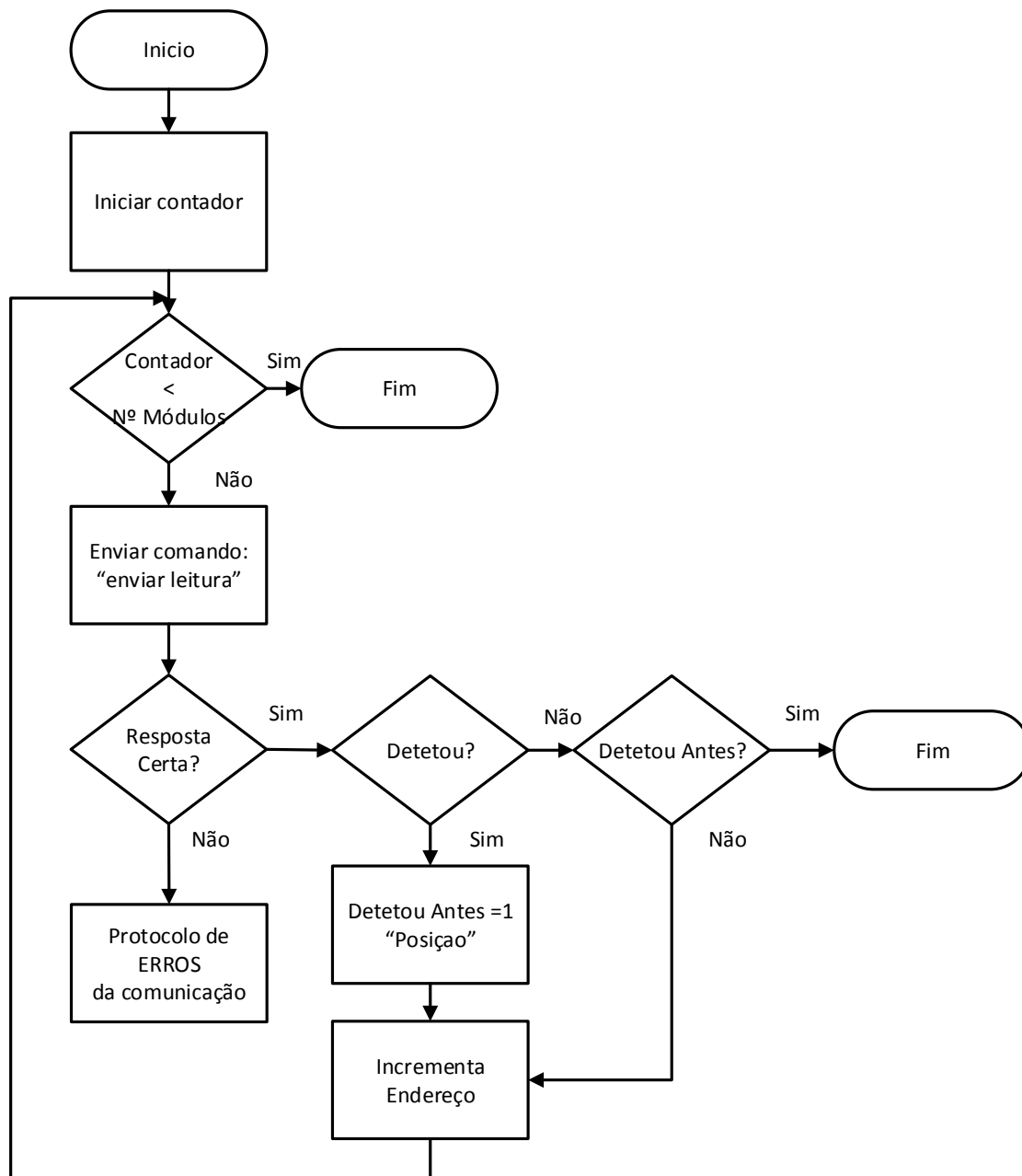


Figura 5.18 Controlo de posição do sistema de controlo

5.2.5. Endereçamento

Devido ao protocolo de comunicação precisar que cada módulo contenha uma identificação única é necessário um sistema de endereçamento de fácil utilização capaz de endereçar os módulos do sistema de levitação, quando existe a necessidade de remover algum módulo para manutenção ou mesmo na montagem inicial da estrutura modular.

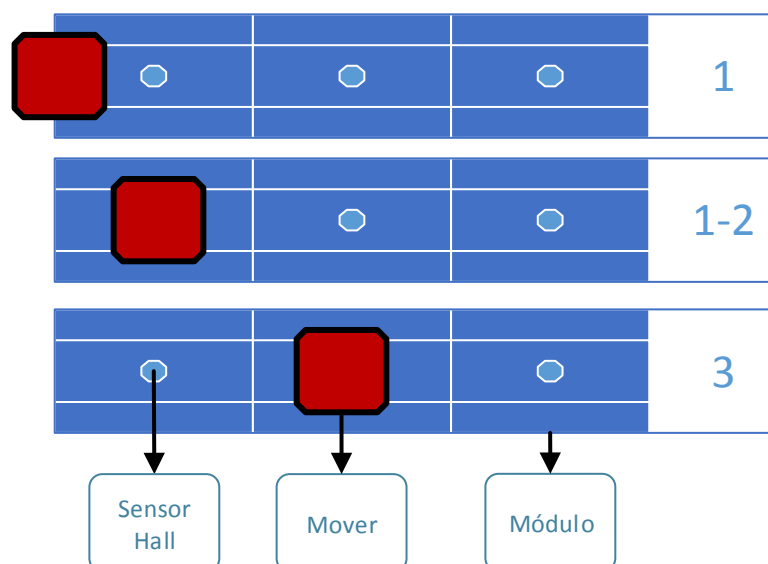


Figura 5.19 Esquema do sistema de endereçamento

O sistema de endereçamento está apresentado no fluxograma da Figura 5.20. Este é inicializado com a definição do endereço inicial e a quantidade de módulos a inicializar pelo utilizador. Seguidamente é enviado um pedido em *broadcast* para que os módulos se coloquem à escuta, ou seja ativem a rotina de leitura do ADC do sensor Hall. Caso seja a primeira vez que o endereço é enviado, o algoritmo do controlador *master* fica à espera de uma resposta dos módulos. Caso seja confirmado pelo controlador *master* que o módulo recebeu o endereço correto é enviado o próximo endereço para os módulos. Caso contrário é ativado um alerta para que o utilizador saiba que ocorreu um erro no endereçamento.

No algoritmo da parte dos módulos, estes ao fim de receberem o comando para ficarem à escuta, esperam que o valor lido pelo sensor Hall seja superior ao valor mínimo que representa que está o *mover* por cima dele. Caso isto aconteça o módulo irá guardar o endereço recebido pelo controlador *master* em memória *flash*, para que em caso de falha de energia ou *reset* do sistema os endereços dos módulos não serem perdidos, o que provocaria uma falha total no sistema. Após a gravação em memória é enviada a resposta ao controlador *master* com o valor guardado em memória.

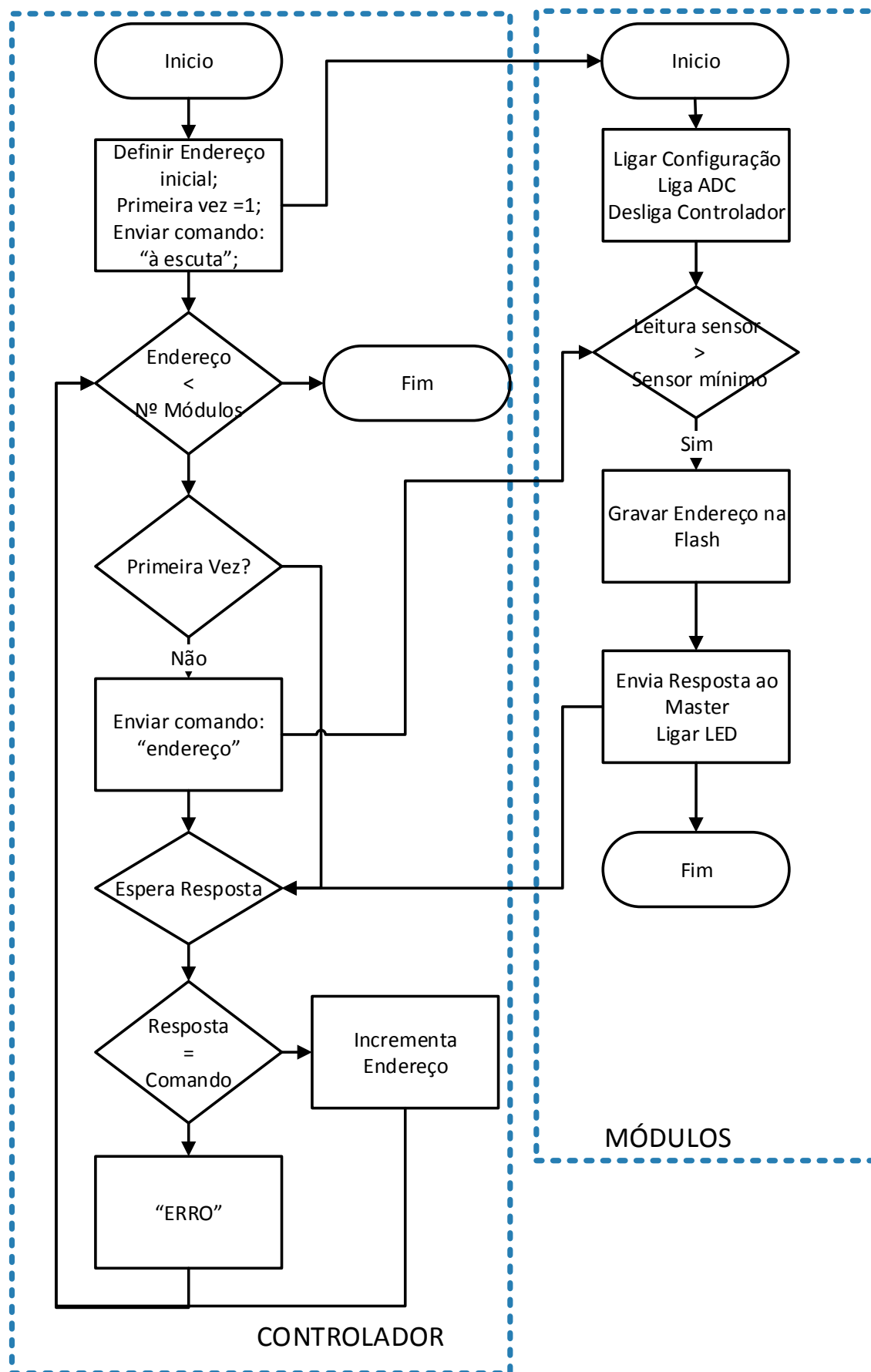


Figura 5.20 Endereçamento de módulos

5.2.6. Interface

A partir dos algoritmos de controlo acima descritos foi desenhado o interface gráfico para a interação com o utilizador e o técnico para o uso e instalação da janela deslizante.

A partir do menu principal, apresentado na Figura 5.21, é possível interagir com a janela deslizante. Com o botão de levitação é possível comandar o sistema de controlo para elevar a janela durante um tempo especificado, dentro de um limite mínimo e máximo, programado pelo utilizador. Quando o tempo máximo ocorre a janela automaticamente inicia a rotina para desligar o sistema de levitação.

Neste menu é possível observar também graficamente qual a localização de cada vidro da janela, de modo o utilizador ter *feedback* do sistema de controlo.

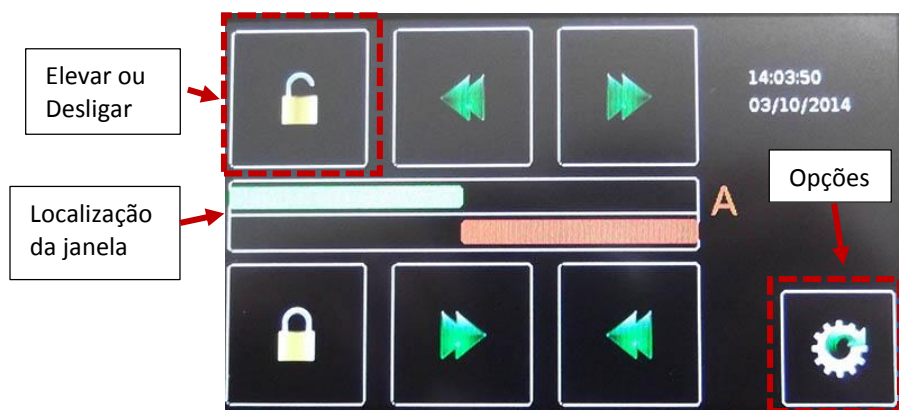


Figura 5.21 Menu principal

A partir do menu de opções, da Figura 5.22, é possível aceder a varias funcionalidades, como a programação do período de levitação, alterar a palavra passe para acesso ao interface, modificar o a hora do dia e data. A partir deste menu é possível ainda aceder ao interface técnico através da palavra passe predefinida 5555.



Figura 5.22 Menu de opções

O interface técnico da Figura 5.23 é responsável pelos comandos para endereçar e configurar os módulos. A partir deste menu é possível configurar a quantidade de módulos que o sistema de levitação contem, qual o vidro da janela que contem o sistema de levitação ou os dois e a partir daqui endereçar cada um dos vidros da janela.



Figura 5.23 Menu de escolha da janela

Com o interface da Figura 5.24 é possível iniciar o algoritmo de endereçamento apresentado na Figura 5.20. Neste interface irá ser apresentado em tempo real o endereço de cada módulo, bem como algum erro que ocorra durante o processo de endereçamento.

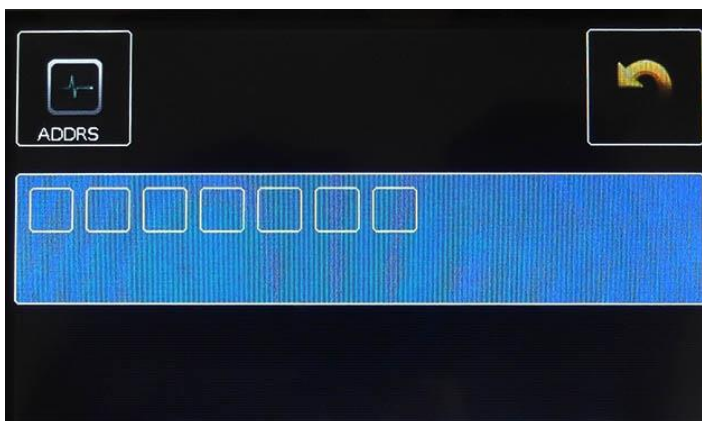


Figura 5.24 Interface de endereçamento

Através do interface da Figura 5.25 é possível configurar os parâmetros de controlo, sendo estes a localização pretendida da janela na levitação, o tempo que cada amostra é adquirida pelo controlador e os ganhos do controlador. Esta interface permite ainda enviar individualmente para cada módulo valores diferentes de controlo ou com o botão de *broadcast* configurar todos os módulos de uma só vez. Através da caixa de texto Módulo # é possível pedir a leitura dos valores dos parâmetros de um módulo à escolha.



Figura 5.25 Configuração dos parâmetros do controlador PID

Pelo interface da Figura 5.26 é possível calibrar o sensor de efeito de Hall, através da adição de uma variável de *offset* ao valor lido pelo ADC do microcontrolador. Este *offset* pode ser enviado individualmente para cada módulo ou para todos eles de uma só vez. Através do botão de leitura é possível pedir de uma só vez a leitura do valor do sensor de efeito de Hall e do seu *offset*.

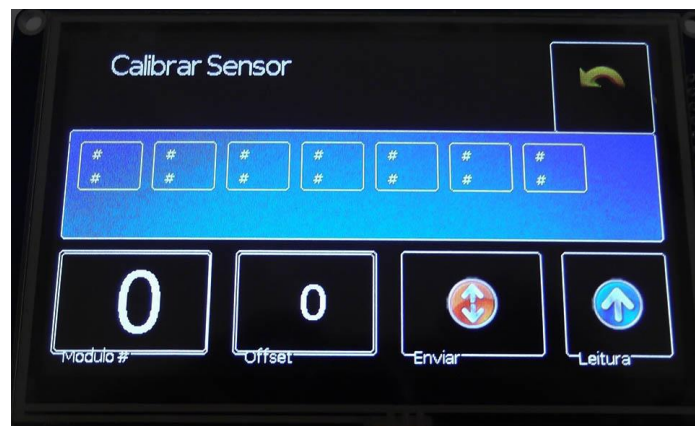


Figura 5.26 Calibração do sensor de efeito de Hall.

O interface na Figura 5.27 é responsável pelo acesso a varias localizações de acesso restrito, tais como palavra passe de acesso ao interface e acesso ao interface técnico.

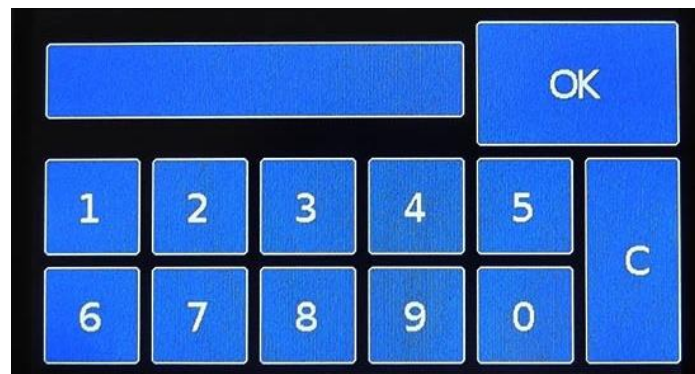


Figura 5.27 Interface teclado

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados focando o funcionamento de todas as componentes implementadas ao longo do projeto.

6.1. Resultados experimentais

Na primeira fase são apresentados os resultados dos testes efetuados aos eletroímãs dos protótipos elaborados.

Os testes aos eletroímãs da topologia I bem como da topologia E foram realizados através do gaussímetro digital GM08 da HIRST *Magnetic Instruments*, apresentado na Figura 6.1. Com estes testes experimentais foram comprovados os resultados obtidos através das simulações, de forma a melhorar o protótipo final.



Figura 6.1 GM08 da HIRST Magnetic Instruments

6.1.1. Topologia I

Após a construção dos eletroímãs foi elaborado o teste prático da leitura do campo magnético, com a variação da corrente no eletroímã.

A partir do eletroímã desenvolvido foi elaborada a medida dos campos magnéticos produzidos à superfície do eletroímã, através do Gaussímetro digital. A

partir dos valores obtidos no teste prático foram obtidos os resultados apresentados no gráfico da Figura 6.2 com núcleo e na Figura 6.3 sem o núcleo.

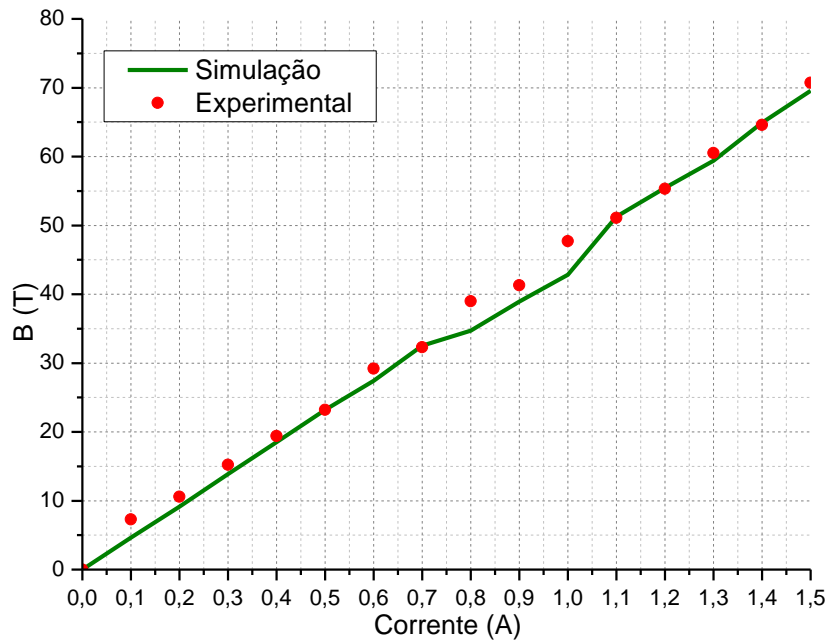


Figura 6.2 Resultado com núcleo ferromagnético

Pela análise dos resultados é possível verificar na Figura 6.2 e na Figura 6.3 que os valores experimentais e os obtidos através de simulação se encontram em concordância, o que permitirá dimensionar apropriadamente o sistema de levitação. Devido aos valores estarem aproximados é possível também concluir que os parâmetros dos componentes da simulação estão corretos.

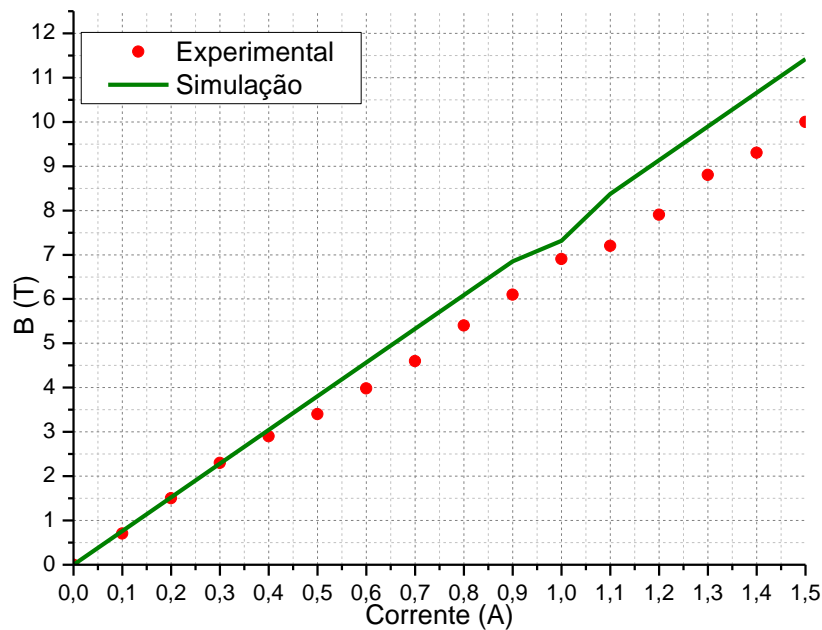


Figura 6.3 Resultado sem núcleo ferromagnético

Esta topologia não foi experimentalmente implementada com ímanes permanentes, bem como não foi contruído nenhum protótipo com ela, devido à instabilidade das estruturas de 30° e 45°.

6.1.2. Topologia E57

Para os testes dos eletroímãs da topologia E foi utilizado semelhantemente aos testes da topologia I, o gaussímetro digital, com uma fonte de laboratório de 30V 4 A.



Figura 6.4 Leitura do campo magnético do eletroíman em topologia E.

Para o propósito da leitura experimental do campo magnético, os pontos de leitura são idênticos aos da simulação efetuada no *software* Ansoft Maxwell no Capítulo 4. Pelos resultados experimentais da Figura 6.5 é possível verificar que os resultados estão também em concordância com os valores simulados.

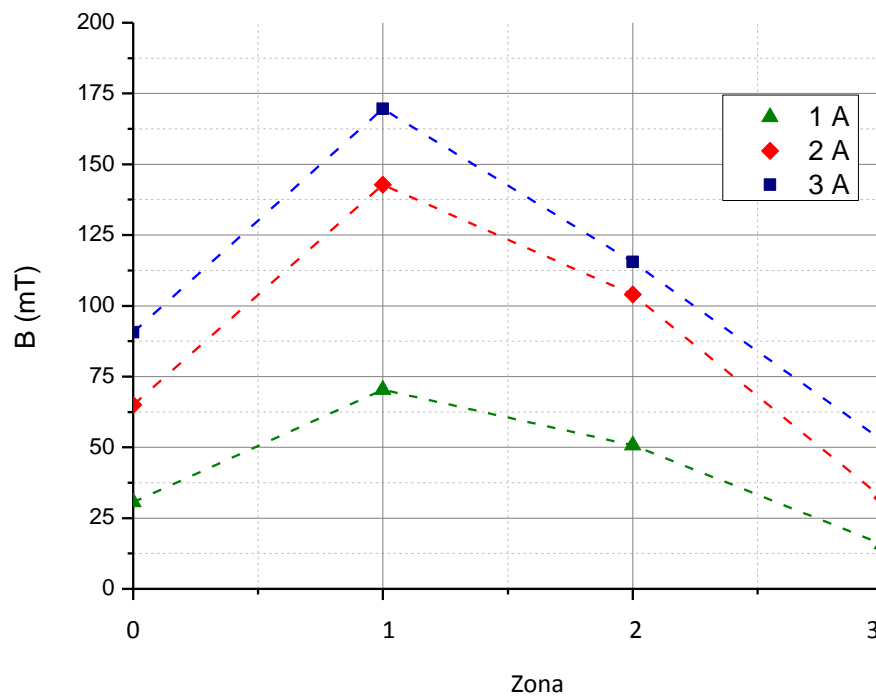


Figura 6.5 Valores práticos do eletroímã 57

6.1.3. Topologia E60



Figura 6.6 Eletroímã E60

Pela comparação com os resultados do eletroímã com núcleo E57, o eletroímã da Figura 6.6 apresenta um campo magnético superior com o aumento do número de espiras do enrolamento do eletroímã.

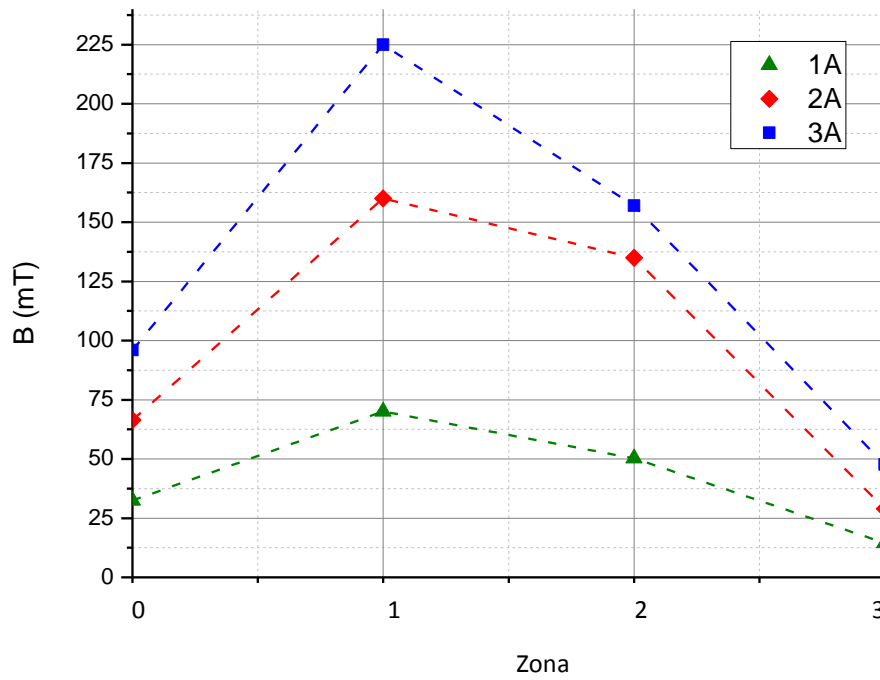


Figura 6.7 Leitura do campo magnético do eletroímã E60

Pela análise dos resultados acima foi possível verificar que os valores dos resultados práticos se encontram próximos dos simulados, o que possibilita uma futura análise total do sistema magnético e algum ajuste necessário sem a necessidade de implementação, ou alteração física no projeto.

6.1.4. Protótipo inicial

Com base o protótipo da Figura 4.22 foram executados testes no equipamento Shimadzu Autograph, disponível no Departamento de Física da universidade do Minho. Este equipamento permite retirar gráficos de força em função da deformação. Este equipamento consegue adquirir os valores das forças aplicadas a partir de uma célula de carga colocada na parte móvel do protótipo.

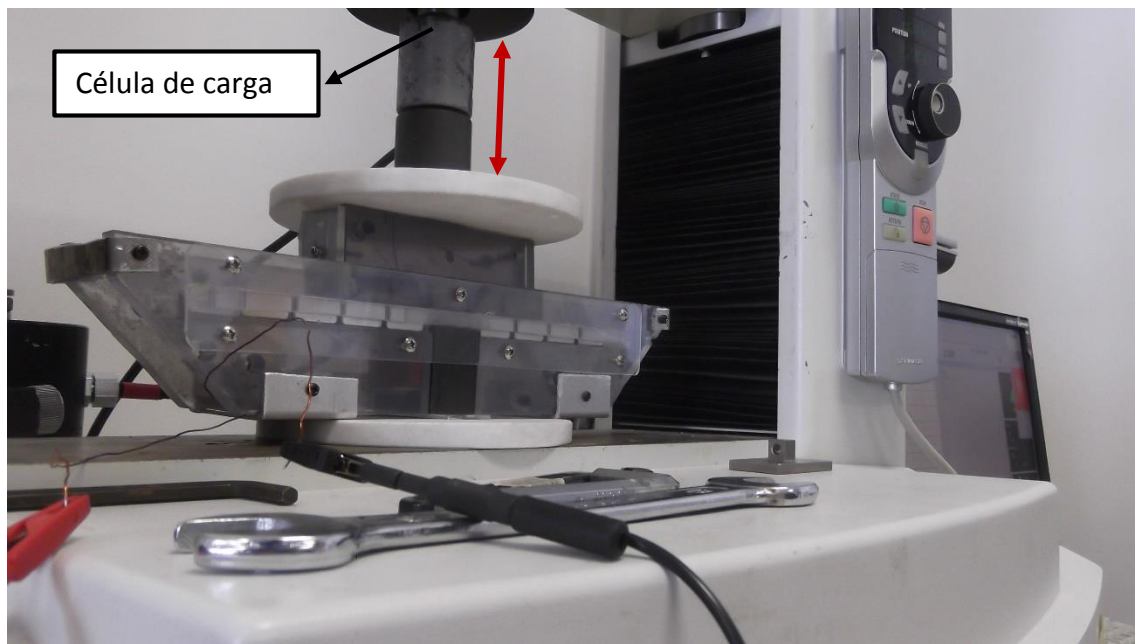


Figura 6.8 Teste de força no equipamento Shimadzu Autograph

O teste da Figura 6.8 foi efetuado através do deslocamento da parte móvel do protótipo causado pelo deslocamento da célula de carga. No percurso da célula de carga o equipamento AUTOGRAPH efetua a leitura da força exercida na célula de carga e do deslocamento para diferentes valores de corrente.

O gráfico da Figura 6.9 é obtido através do interface do equipamento AUTOGRAPH, onde são gravados diretamente para ficheiros os resultados obtidos. Para a calibração do equipamento foi aproximada a célula de carga até esta detetar uma força, onde foi marcado os 0 mm de distância. A força foi medida até a um deslocamento de 9.5 mm onde o eletroímã está localizado.

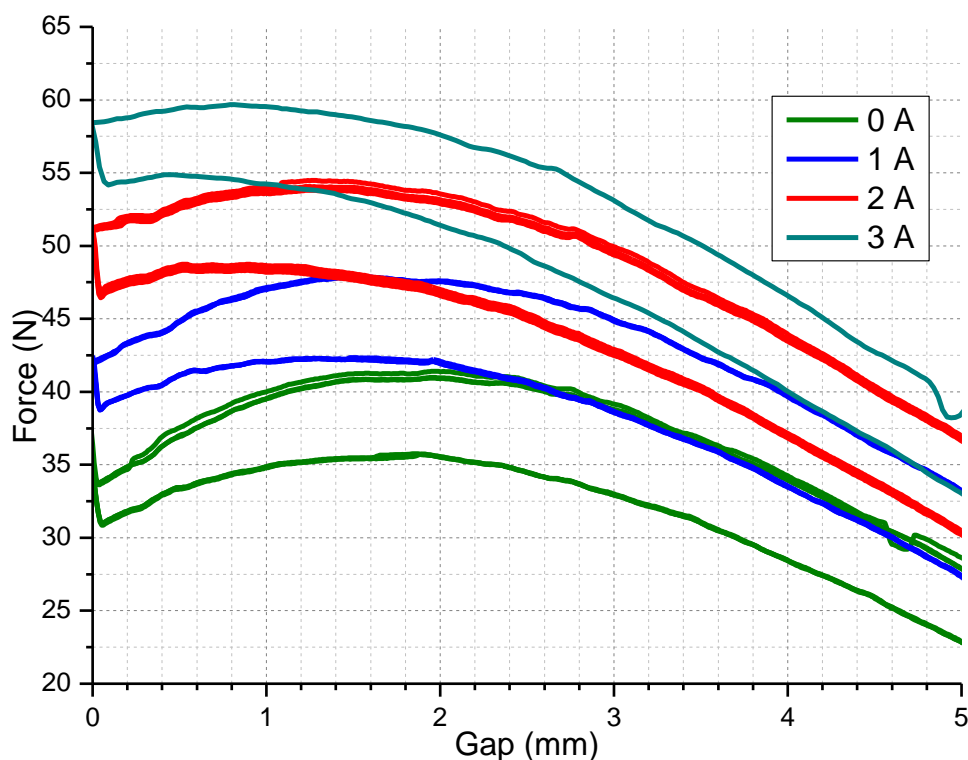


Figura 6.9 Teste da força produzida pelo protótipo.

Com base nos resultados da Figura 6.9 é possível verificar que este protótipo, sem corrente, ou seja, só com os ímãs permanentes, exerce a parte fundamental da força necessária para a elevação da janela e com a regulação da corrente aplicada ao eletroímã é possível obter uma variação da altura do veículo. No gráfico é possível também observar uma variação na leitura obtida, devido a uma folga de aproximadamente 0.1 mm existente no sistema de fixação dos ímãs permanentes da parte fixa.

Nesta fase de desenvolvimento foi possível obter resultados satisfatórias. Esta topologia de eletroímã e ímãs permanentes apresentou-se capaz de resolver as necessidades apresentadas.

6.1.5. Sensor de posição

Na realização do controlo de levitação da janela deslizante foram efetuados testes que serão apresentados a seguir. No gráfico da Figura 6.10 podem observar os resultados obtidos da variação da distância dos ímãs da parte móvel da janela deslizante em relação ao sensor de efeito de Hall. Pelo gráfico é possível verificar a linearidade do sensor, e consequentemente determinar a variação da tensão por cada milímetro de deslocamento. Pelo gráfico podem ainda verificar que é possível obter

leituras para 6 mm de deslocamento, a partir deste valor como foi apresentado no Capítulo 5 o sensor apresenta sempre o mesmo valor na saída.

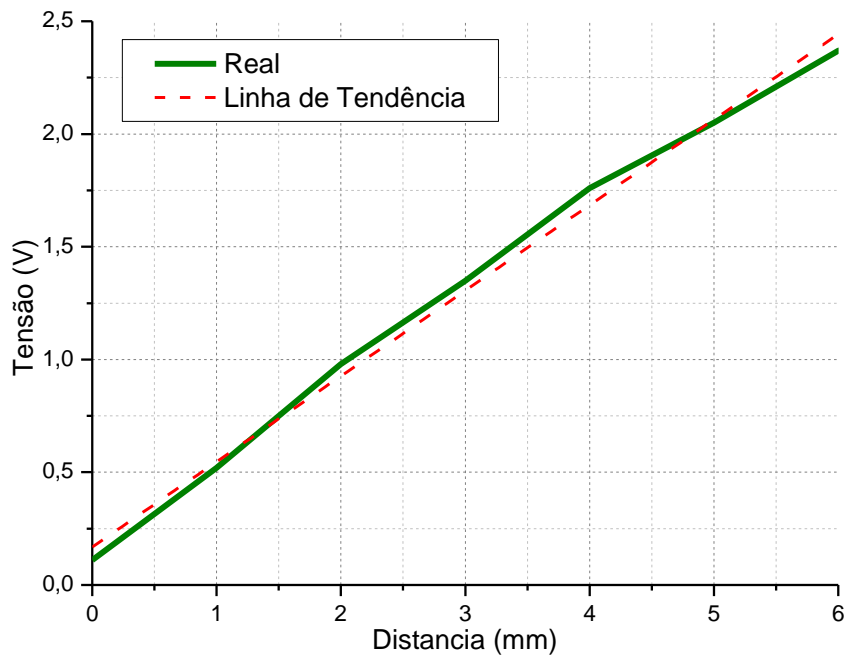


Figura 6.10 Variação da distância em função da tensão no sensor de efeito de Hall.

6.2. Protótipo Final

No final dos resultados individuais aos componentes do sistema de deslizamento magnético foi implementado todos eles no protótipo final, como mostra a Figura 6.11. Para conseguir efetuar o controlo do sistema foram montados 7 módulos, com 200 mm de comprimento de forma a preencher os 1400 mm de comprimento total da janela.

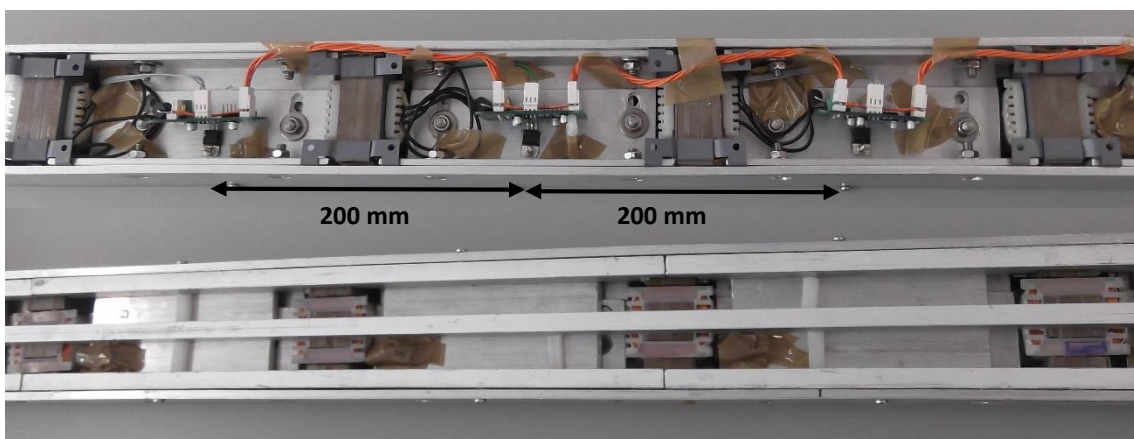


Figura 6.11 Estrutura fixa da janela deslizante

Na Figura 6.12 está apresentada a placa de controlo presente em cada módulo, bem como o eletroímã E60 dimensionado no Capítulo 4.

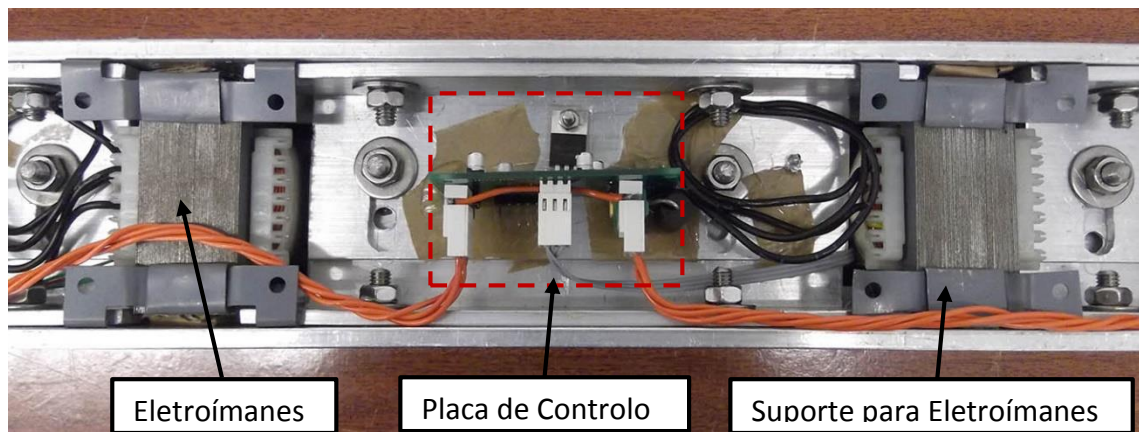


Figura 6.12 Estrutura fixa, vista traseira.

Na Figura 6.13 está apresentado o sistema de deslizamento, onde o envidraçado da janela será colocado. Na figura é possível identificar a localização dos sensores de efeito Hall para deteção da altura da janela. A guia central é responsável por impedir que o envidraçado se desloque lateralmente da estrutura.

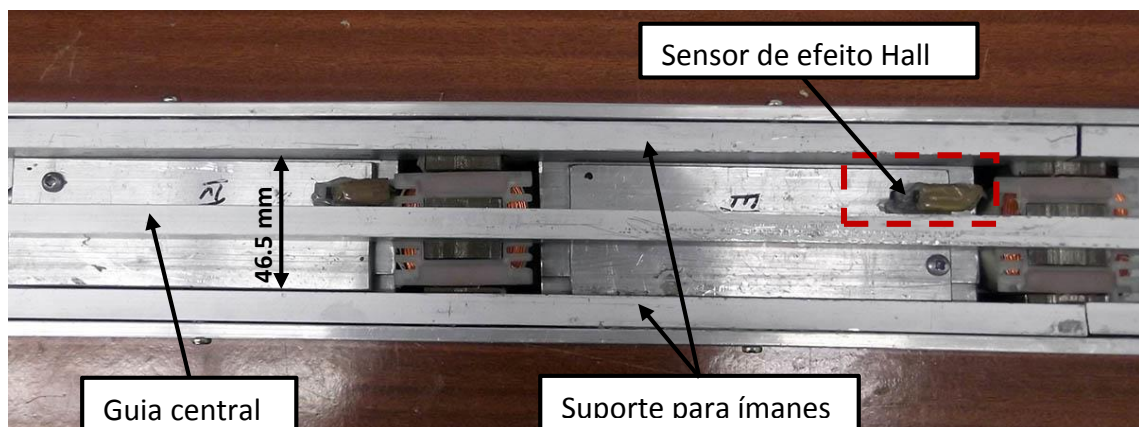


Figura 6.13 Estrutura Fixa, vista de cima

Na Figura 6.14 está apresentado o LCD de controlo do sistema de levitação. A caixa contém as ligações para a alimentação do sistema de controlo e eletroímãs, provenientes da fonte de alimentação.



Figura 6.14 Controlador

Após a construção e testes individuais de cada componente foi montado todo o sistema para o funcionamento da janela deslizante. O sistema completo pode ser visualizado na Figura 6.15. Para além dos componentes vistos em detalhe anteriormente é possível observar o perfil de suporte da janela adaptado para acomodar o sistema desenvolvido. Com esta estrutura é possível através do controlador variar a altura da janela de 0 mm a 4 mm para permitir o seu deslizamento. Esta variação da altura é conseguida com uma potência máxima de 200 W.

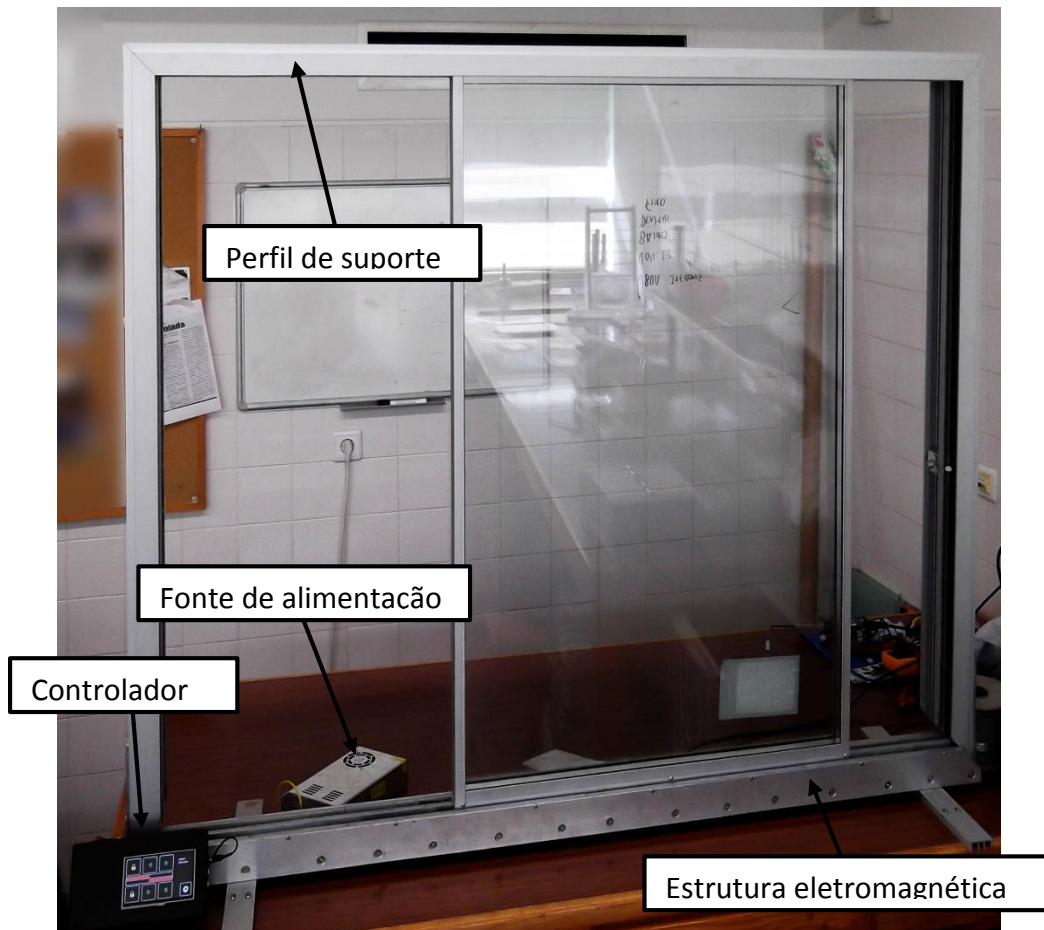


Figura 6.15 Protótipo final

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

Este último capítulo inclui as conclusões acerca do projeto realizado, salientando as características mais vantajosas do sistema, bem como algumas indicações para futuras investigações na área que podem ser interessantes para a melhoria do modelo apresentado.

7.1. Conclusão

Neste projeto de dissertação estudou-se e implementou-se uma solução modular para um sistema de deslizamento magnético, dimensionado especificamente para um sistema de janelas deslizantes.

Para desenvolver este sistema foram necessárias várias componentes sendo que, neste documento foi dado maior foco ao dimensionamento do sistema magnético, incluindo a seleção e construção dos eletroímãs e da eletrónica de controlo.

O sistema eletromagnético demonstrou pelos resultados práticos ser um sistema com uma grande flexibilidade em conjugação com os ímãs permanentes, tendo um consumo energético reduzido.

A solução apresentada encontra-se na forma de protótipo, o que significa que no futuro, sofra processos para a sua melhoria até chegar ao produto final. Os resultados experimentais obtidos vêm viabilizar a solução, demonstrando que o sistema responde às necessidades inicialmente propostas.

7.2. Trabalho futuro

A implementação apresentada pode ser melhorada, uma vez que este é o primeiro passo de implementação de um sistema de levitação utilizando eletroímãs e

ímãs permanentes para um sistema de janelas deslizantes. Neste subcapítulo são apresentadas algumas sugestões para serem implementadas no futuro.

Relativamente ao sistema eletromagnético é necessário um sistema de dissipação do calor produzido pelos eletroímãs em funcionamento, uma vez que o protótipo é suposto ser vulcanizado, o que limita a circulação de ar por eles.

O sistema eletromagnético pode ser objeto de um novo estudo de forma a dimensionar eletroímãs capazes de suportar a mesma massa mas com dimensões mais reduzidas sendo eles a principal variável que influencia o tamanho do protótipo realizado. Para além de um novo estudo na escolha de novos materiais na construção dos eletroímãs é pertinente considerar para a redução das dimensões dos eletroímãs a colocação de um sistema de arrefecimento nos eletroímãs, permitindo assim a elevação da corrente aplicada e consequentemente o aumento do campo magnético produzido.

No sistema sensorial é pertinente implementar um sistema alternativo com um maior número de sensores de forma a reduzir erros de leitura de forma a prevenir acionamentos falsos do sistema. Uma possível solução para este problema é apresentada na Figura 7.1. Este sistema utilizaria quatro sensores de efeito *Hall* lineares por cada módulo, em que dois deles colocados de forma a prevenir erros de leitura da folga lateral e os restantes colocados simetricamente do outro lado dos eletroímãs para deteção da deslocação da janela da esquerda para a direita e vice-versa.

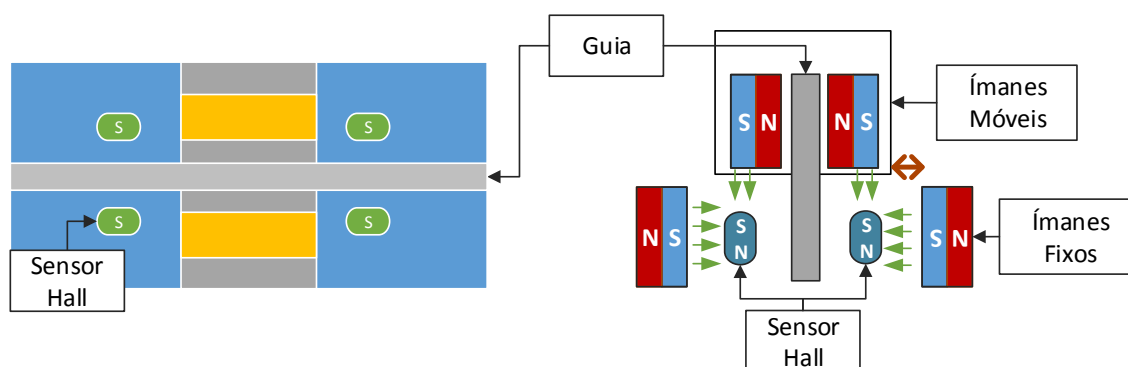


Figura 7.1 Esquema da colocação dos sensores de posicionamento.

Quanto à aplicação de gestão e monitorização dos módulos, poderá ser alvo de modificações, de modo a introduzir melhorias na análise do estado e à gestão dos módulos. Neste momento a aplicação cumpre os requisitos estabelecidos, que são essenciais para o seu funcionamento, mas pode ser melhorada com novas funcionalidades e maior controlo de erros.

Para além das possíveis melhorias no sistema de levitação implementado no futuro espera-se introduzir o sistema de propulsão. Segundo o estudo efetuado no decorrer do projeto este seria efetuado através de um motor síncrono linear, como é o caso dos sistemas de transporte terrestres.

Referências

- [1] H. Yaghoubi, “Practical Applications of Magnetic Levitation Technology Technology,” 2012.
- [2] Richard Freeman, “The Science of Maglev,” *Printed in the American Almanac*, 1993. [Online]. Available: http://members.tripod.com/~AMERICAN_ALMANAC/maglev.htm.
- [3] H. Kemper, “Schwebebahn mit raederlosen Fahrzeugen, die an eisernen Fahrschienen mittels magnetischer Felder schwebend entlang gefuehrt werden,” DE 643316 C05-Apr-1937.
- [4] “Hermann Kemper - Maglev Genius,” 2009. [Online]. Available: <http://www.maglev.net/news/hermann-kemper-maglev-genius>.
- [5] H.-W. L. H.-W. Lee, K.-C. K. K.-C. Kim, and J. L. J. Lee, “Review of maglev train technologies,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 7, pp. 1917–1925, 2006.
- [6] “Sustainability Through Technology Part 1 - Magnetic Levitation,” 2012. [Online]. Available: http://www.personal.psu.edu/cjm5/blogs/west_of_everything_with_english_003_fall_2012/2012/12/it-is-not-certain-that.html. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [7] “About Maglev.” [Online]. Available: <http://magnetbahnforum.de/>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [8] ThyssenKrupp, “Transrapid System.” [Online]. Available: <http://www.transrapid.de/>. [Accessed: 02-Aug-2014].
- [9] Florida State University, “Introduction to Superconductivity.” [Online]. Available: <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/superconductivity101/maglev.html>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [10] R. F. Post and D. D. Ryutov, “The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation,” *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 10, no. 1, pp. 901–904, Mar. 2000.
- [11] JLRuiz, “Inductrack, levitación magnética para el transporte,” 2012. [Online]. Available: <http://ies.camilojosecela.climantica.org/>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [12] “Maglev Train.” [Online]. Available: <http://www.odec.ca/projects/2011/danne2/EMS.html>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [13] L. S. Tung and R. F. Post, “Final Progress Report for the NASA Inductrack Model Rocket Launcher at the Lawrence Livermore National Laboratory,” 2001.
- [14] “MagneMotion.” [Online]. Available: <http://www.magnemotion.com/>. [Accessed: 19-Mar-2014].
- [15] W. Kim and S. C. . Paschall II, “Design , Fabrication , and Control of a Single Actuator Magnetic Levitation System,” *Mech. Eng. Dep.*, 2002.
- [16] Paul Alves, “Magnetic Bearings - A Primer,” *Proc. 27 th Turbomach. Symp. Texas A&M Univ. Coll. Station. Texas*, 1998.
- [17] “Magnetic Bearing,” 2012. [Online]. Available: [http://www.buyskfonline.com/bearingproduct/magnetic bearing](http://www.buyskfonline.com/bearingproduct/magnetic%20bearing). [Accessed: 13-Sep-2014].
- [18] R. J. Protheroe, *Essential Electromagnetism*, 1^a ed. 2013.

- [19] “Maxwell’s Equations.” [Online]. Available: <http://www.maxwells-equations.com/>. [Accessed: 29-Sep-2014].
- [20] “Magnetic Hysteresis Loop including the B-H Curve.” [Online]. Available: <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html>. [Accessed: 08-Sep-2014].
- [21] D. J. Griffiths and R. College, *Introduction to electrodynamics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 1999.
- [22] R. G. Carter, *Electromagnetism for Electronic Engineers*, 1^a ed. 2010.
- [23] “HyperPhysics.” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>. [Accessed: 29-Sep-2014].
- [24] Honeywell, “Hall Effect Sensing and Application,” *Sens. Control*.
- [25] B. G. Pepka, “Position and Level Sensing Using Hall Effect Sensing Technology,” *Allegro MicroSystems*.
- [26] T. Kugelstadt and H. P. L. Interface, “The RS-485 Design Guide,” no. May, pp. 1–9, 2008.
- [27] P. Covered, “RS485 & Modbus Protocol Guide Products Covered,” 2000.
- [28] I. A. S. MODICON, Inc., “Modicon Modbus Protocol Reference Guide,” 1996.
- [29] ANSYS Inc, “ANSYS Maxwell 3D,” 2012.
- [30] “American Wire Gauge Table,” 2014. [Online]. Available: http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm. [Accessed: 23-Sep-2014].
- [31] Atmel, “ATmega328P Datasheet,” 2009. [Online]. Available: http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet.pdf. [Accessed: 05-Oct-2013].
- [32] T. Instruments, “MSP430G2553 Datasheet,” 2013. [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/msp430g2553>. [Accessed: 05-Oct-2013].
- [33] Atmel, “ATtiny841 Datasheet,” 2014. [Online]. Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8495-8-bit-AVR-Microcontrollers-ATtiny441-ATtiny841_Datasheet.pdf. [Accessed: 05-Oct-2013].
- [34] “Farnell.” [Online]. Available: <http://pt.farnell.com/>. [Accessed: 20-Nov-2013].
- [35] Atmel, “SAM3X8E Datasheet,” 2012. [Online]. Available: <http://www.atmel.com/images/doc11057.pdf>. [Accessed: 20-Jul-2014].
- [36] Atmel, “ATmega2560,” 2012. [Online]. Available: <http://www.atmel.com/images/doc2549.pdf>. [Accessed: 20-Sep-2014].
- [37] F. B. Diagram, “Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs.”
- [38] T. Instruments, “SN65176B: RS-485 Transceivers.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/sn65176b>. [Accessed: 22-Sep-2014].

Anexos

Anexo 1 - Esquemático e PCB da placa *drive*

